



TEKNIIKAN JA LIIKENTEEN TOIMIALA

Sähkötekniikka

Sähkövoimatekniikka

INSINÖÖRITYÖ

VUOSAAREN SATAMAN SÄHKÖVERKON SUOJAUS

**Työn tekijä: Marko Särkkä
Työn valvoja: leht. Sampsa Kupari
Työn ohjaaja: dipl.ins. Kirsi Raami**

Työ hyväksytty: 11.4. 2007

**Sampsa Kupari
lehtori**



ALKULAUSE

Tämä insinöörityö on tehty Helsingin Energian HelenEngineering liiketoimintayksikölle, joka on konsulttisopimuksella vastannut Vuosaaren Sataman sähköverkon suunnittelusta.

Haluan kiittää lämpimästi mielenkiintoisesta ja haasteellisesta aiheesta työni ohjaajaa HelenEngineeringin ryhmäpäällikköä, dipl.ins. Kirsi Raamia.

Työni valvojana on toiminut Helsingin ammattikorkeakoulun sähkötekniikan koulutusjohtaja, lehtori Sampsa Kupari, jota haluan kiittää insinöörityöhön liittyvistä tärkeistä kommentteista sekä pätevästä opetuksesta opiskeluvuosieni aikana.

Haluan kiittää myös muita projektissa mukana olleita, erityisesti Helen Sähköverkko Oy:n suojaus- ja sähkönlaatuinsinööri Jari Virtasta, jonka suojausasioihin liittyvää ammattitaitoa on työssä hyödynnetty sekä Helen Sähköverkko Oy:n Risto Seppästä X-power-ohjelman laskelmista.

Helsingissä 13.3.2007

Marko Särkkä

INSINÖÖRITYÖN TIIVISTELMÄ

Tekijä: Marko Särkkä	
Työn nimi: Vuosaaren Sataman sähköverkon suojaus	
Päivämäärä: 13.3.2007	Sivumäärä: 70 s. + 5 liitettä
Koulutusohjelma: Sähkötekniikka	Suuntautumisvaihtoehto: Sähkövoimatekniikka
Työn valvoja: lehtori, dipl.ins. Sampsa Kupari	
Työn ohjaaja: dipl.ins. Kirsi Raami	
<p>Insinöörityössä on tutkittu Vuosaaren rakennettavan sataman omistaman sähköverkon topologiaa, tehonjakoa ja ennen kaikkea niitä toteutusperiaatteita, joilla sataman sähköverkko suojataan ylikuormituksia, oikosulkuja, ja maasulkuja vastaan.</p> <p>Työn alussa on esitelty yleisesti koko Vuosaaren satamahanke, siihen liittyvät taustat, toimijat, kustannukset ja liikenneyhteydet.</p> <p>Seuraavaksi on esitelty läpileikkaus relesuojaustekniikan perusteista ja käyty läpi suojaruletyypit ja -lajit sekä mittamuuntajat. Työssä on esitelty eri suojauskohteiden toteutusperiaatteet sekä sulakesuojaus. Edelleen työssä on esitelty Vuosaaren sataman sähköverkon rakenne, sen komponentit ja peruskäyttötilanteet sekä se osa Helenin verkkoa, josta satama saa syöttönsä.</p> <p>Työssä on laskettu sataman verkon eri kohdissa esiintyvät maksimi- ja minimioikosulkuvirrat IEC60909 mukaisesti sekä lasketaan karkeasti esiintyvät maasulkuvirrat. Työssä esitellään ne suojausperiaatteet, joiden avulla sataman verkon suojauksesta saadaan järkevä kokonaisuus.</p> <p>Johtopäätöksenä voidaan todeta, että taustaverkon oikosulkutehon ollessa kyseisellä alueella niinkin suuri, sataman sähköverkossa oikosulkuvirtojen suhteen ei aiheudu ongelmia. Riittävä oikosulkusuojaus saadaan helposti aikaan aikaporrastuksilla. Maasulkuvirtojen suhteen sataman verkolla on marginaalinen rooli Helenin taustaverkkoon nähden, joten maasulkusuojaus saadaan toimivaksi suunnatuilla suojilla täydennettynä aikaporrastuksella.</p>	
Avainsanat: oikosulkusuojaus, maasulkusuojaus	

ABSTRACT

Name: Marko Särkkä	
Title: Protection of electricity distribution network of Vuosaari harbour	
Date: 13.3.2007	Number of pages: 70 + 5 appendixes
Department: Electrical Engineering	Study Programme: Electrical Power Engineering
Instructor: Sampsa Kupari, Lecturer, M.Sc. Supervisor: Kirsi Raami, M.Sc.	
<p>The purpose of this study was to investigate the topology and power division along with a suitable and effective protection strategy for the electric power supply system of the Vuosaari harbour. The work was commissioned by Helsinki Energy.</p> <p>This study first introduces the history, costs, and the main participants in the Vuosaari harbour project. The basic theory of relay and fuse protection is then discussed. A description of the Standards SFS 6001 and IEC 60909 is also included.</p> <p>The short-circuit currents in the different parts of the harbour network were calculated by using two different computer programmes (Excel and X-power). A rough calculation of the earth fault currents was made.</p> <p>The minimum asymmetric short-circuit currents in the least favourable part of the 400-volt distribution network were calculated by using positive, negative, and zero sequence systems and IEC 60909 factors.</p> <p>The analysis of the results indicates that the short-circuit current levels in the harbour network were so high that it would be easy to provide a reliable time-delayed short-circuit protection system.</p> <p>It appears that earth fault currents to be occurring in the harbour network depend strongly on the surrounding Helsinki Energy network. A directional time-delayed earth fault protection system is easy to provide.</p> <p>The study seems to indicate that in the 400-volt distribution network the minimum short-circuit currents were sufficient even in the least favourable part of the network.</p>	
Keywords: short-circuit protection, earth fault protection	

SISÄLLYS

ALKULAUSE

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

SISÄLLYS

1	JOHDANTO	1
2	VUOSAAREN SATAMAHANKE	2
2.1	Satamahankeen historia	2
2.2	Hankkeen toteuttajat	3
2.3	Hankkeen kustannukset	3
2.4	Satamakeskus	3
2.4.1	Satama-alue	3
2.4.2	Logistiikka-alue	3
2.4.3	Meriportin yritysalue	4
2.5	Satama-alueen liikenne-yhteydet	4
2.5.1	Meriväylä	4
2.5.2	Maayhteydet	5
3	RELESUOJAUSTEKNIikka	6
3.1	Relesuojauksen edellytykset	6
3.2	Selektiivisyys	6
3.3	Yleisesti esiintyvät suojareleetyypit	7
3.3.1	Ensiö- eli primäärireleet	7
3.3.2	Sähkömekaaniset toisioreleet	7
3.3.3	Tasasuuntaajareleet	8
3.3.4	Staattiset releet (elektroniset releet)	8
3.3.5	Numeeriset releet	8
3.4	Tiedonkeruu ja tietoliikenne	9
3.5	Tärkeimmät suojarelelajit	10
3.5.1	Virtareleet	10
3.5.2	Alijännitereleet	12
3.5.3	Ylijännitereleet (jännitteennousureleet)	12
3.5.4	Taajuusreleet	12
3.5.5	Suunta- ja tehoreleet	13
3.5.6	Epäsymmetriareleet	13
3.5.7	Vertoreleet	14
3.5.8	Distanssireleet	14
3.6	Mittamuuntajat	15
3.6.1	Jännitemuuntajat	15
3.6.2	Virtamuuntajat	18
3.7	20 kV:n Virta- ja jännitesensorit	21
3.7.1	Virtasensorit	21
3.7.2	Jännitesensorit	22
3.8	Muuntajasuojaus	24
3.9	Kiskosuojaus	24

3.10	Jakeluverkon johtosuojaus	25
3.10.1	Oikosulkusuojaus	25
3.10.2	Maasulkusuojaus	33
3.11	Sulakesuojaus	45
4	HELSINGIN ENERGIAN SÄHKÖVERKKO	46
4.1	Tuotantolaitokset	46
4.2	Siirto- ja jakeluverkko	46
4.3	Vuosaaren voimalaitokset	47
4.4	Vuosaaren sähköasema	47
5	VUOSAAREN SATAMAN SÄHKÖVERKKO	48
5.1	Sataman 20 kV:n järjestelmä	48
5.1.1	20 kV:n jakeluverkon topologia	48
5.1.2	Tehonjako satamassa	49
5.1.3	Kojeistot	50
5.1.4	Mittamuuntajat	50
5.1.5	Suojareleet	51
5.1.6	Kuormanerotimet	53
5.1.7	Kaapelit	53
5.2	Muuntajat	53
5.3	Sataman 400 V:n järjestelmä	53
5.3.1	Kiskosillat	53
5.3.2	Keskukset	53
5.3.3	Katkaisijat	54
5.3.4	Kaapelointi	54
5.4	Maadoitusjärjestelmä	54
5.5	Oikosulkusuojaus	55
5.5.1	Laskennan lähtökohdat	55
5.5.2	Excel-sovellus	55
5.5.3	X-power-verkostolaskentaohjelma	57
5.5.4	Oikosulkusuojauksen toteutus	59
5.6	Maasulkusuojaus	65
5.6.1	Maasulkulaskennan lähtökohdat	65
5.6.2	Maasulkuvirrat	65
5.6.3	Maasulkujännitteet	66
5.6.4	Maasulkusuojauksen toteutus	66
6	YHTEENVETO	67
6.1	Topologiatarkastelu	67
6.2	Tehonjakotarkastelu	68
6.3	Suojauskoordinaatio	68
	LÄHTEET	69
	LIITTEET	
LIITE 1	Satamakeskuksen toiminnallinen yleissuunnitelma	
LIITE 2	Keskijänniteverkon yleissuunnitelma	
LIITE 3	20 kV:n yleiskaavio ja tehonjako	
LIITE 4	Sataman oikosulkuvirrat ja releasettelut	
LIITE 5	Vuosaaren sataman suojauskaavio	

1 JOHDANTO

Insinööriyössä on tavoitteena selvittää, tutkia ja seurata niitä mahdollisuuksia, joilla Vuosaaren sataman sähkönjakeluverkon topologia, tehonjako ja erityisesti suojauskoordinaatio toteutetaan.

Työssä tutkitaan ja esitellään relesuojaustekniikkaa varsin laajasti siitä syystä, että satama saatetaan joutua liittämään Helenin verkkoon 110 kV:n liittjänä. Lisäksi Helen Sähköverkko Oy:n tulevaisuuden suunnitelmissa on siirtyä kompensoituun keskijänniteverkkoon.

Laajuuteen on pakottanut osittain myös se tosiseikka, että allekirjoittanut on pitkään toiminut laaja-alaisesti sähköliasantajan ammatissa juuri Helenillä, sekä tytäryhtiö Suomen Energia-Urakointi Oy:ssä ja ollut rakentamassa sekä Vuosaaren voimalaitosta että Vuosaaren sähköasemaa.

Helsingin Energia

Helsingin Energia on kunnallinen liikelaitos, jonka toimintaa kehittää ja valvoo Helsingin kaupungin Tekninen lautakunta. Helsingin Energia, (Helen) on Suomen suurin kaukolämmön ja sähkönsiirtopalveluiden myyjä.

Helsingin Energia myy sähköä yli 300 000 asiakkaalle kaikkialle Suomeen ja kaukolämpöä yli 90 prosentille pääkaupungin rakennuksista. Helen on kolmanneksi suurin sähköenergian vähittäismyyjä Suomessa. Helen on merkittävä toimija myös pohjoismaisilla sähkömarkkinoilla ja pohjoismaisessa Nord Pool-sähköpörssissä. [1.]

Helsingin Energian liiketoimintaorganisaatio muodostuu seitsemästä pääliiketoiminnosta, viidestä erillisestä liiketoimintayksiköstä ja palvelutoiminnoista.

HelenEngineering

HelenEngineering on Helenin liiketoimintayksikkö joka tarjoaa monipuolisia energiantuotannon projektipalveluja sekä energiaselvityksiä energia- ja teollisuusyrityksille Suomessa. Helenin omien tuotantolaitosten ja jakelujärjestelmien suunnittelusta ja rakentamisesta kartutetulla tiedolla ja kokemuksella HelenEngineeringin projektinhallinta käsittää ainutlaatuisen kokonaisuuden.

Tämä insinööri työ on tehty HelenEngineering liiketoimintayksikölle, joka vastaa Vuosaaren sataman projektin alueellisen sähköverkon suunnittelusta ja rakennuttamisesta.

Vuosaaren satamaprojekti

Satamalautakunta on päättänyt hankkia konsulttisopimuksella Vuosaaren satamaan liittyvän sähkönjakeluverkon, aluevalaistuksen ja tiedonsiirtoverkon suunnittelun ja rakennuttamisen Helsingin Energialta 16.6.2005.

Vuosaareen rakennettavan sataman sähköverkko vastaa teholtaan ja laajuudeltaan pienen kaupunginosan jakeluverkkoa. Satamaoperaattoreiden tuottama lastinkäsittely, varastointi ja tavaranhallinta vaativat sähkö- ja tietojärjestelmiltä paljon tehonsiirtokykyä. Verkon käytönhallinnasta ja suojauskoordinaatiosta tekee haastavan sen silmukoidun rakenteen lisäksi mahdolliset muut kuormitukset, joilla on tehon takaisinsyöttöominaisuuksia.

2 VUOSAAREN SATAMAHANKE

2.1 Satamahankeen historia

Vuosaarta Helsinkiin liitettäessä vuonna 1966, yhtenä perusteluna oli alueen soveltuminen satamatarkoituksiin. Ensimmäinen yleissuunnitelma, jossa satama on Valmetin telakan ja Porvarinlahden välisellä alueella, esitettiin jo vuonna 1975, mutta vasta vuonna 1996 Helsingin kaupunginvaltuusto hyväksyi perustamissuunnitelman.

Vuoden 2002 tammikuussa ympäristöministeriö vahvisti Vuosaaren sataman seutu- ja asemakaavan. Saman vuoden lopulla Helsingin kaupunginvaltuusto teki päätöksen sataman ja eduskunta sen liikenneyhteyksien rakentamisesta. Vuosaaren sataman rakentaminen aloitettiin tammikuussa 2003. [2.]

Sataman valmistuttua sinne keskitetään tavarasatamatoiminnot Länsisatamasta ja Sörnäisten satamasta, jolloin kantakaupungista vapautuu alueita muuhun rakentamiseen sekä raskaan liikenteen haitat kantakaupungissa vähenevät.

2.2 Hankkeen toteuttajat

Vuosaaren satamakeskuksen toteuttavat yhteistyössä Helsingin Satama, Merenkulku-laitos, Ratahallintokeskus ja Tiehallinto. Sataman peruskivi muurattiin 7.1.2003. Vuosaaren satama otetaan käyttöön vuonna 2008.

2.3 Hankkeen kustannukset

Vuosaaren sataman rakennuttaa Helsingin Satama ja sen kokonaiskustannuksiksi on arvioitu 602,7 milj. euroa. Sataman osuus on n. 313,7 milj. euroa ja liikenneyhteyksien rakennuskustannukset ovat 289 milj. euroa ja niiden rakennuttajana toimii valtion VUOLI-projekti (Tiehallinto, Ratahallintokeskus ja Merenkululaitos). Liikenneyhteyksien rakennuskustannukset jakautuvat puoliksi Valtion ja Helsingin sataman kesken. [3.]

2.4 Satamakeskus

Vuosaareen rakennetaan satamakeskusta joka käsittää itse satama-alueen, sen yhteydessä toimivan logistiikka-alueen, meriportin yritysalueen, sekä satama-alueen liikenne-yhteydet.

2.4.1 Satama-alue

Entiselle telakka-alueelle rakennettavan Vuosaaren sataman laajuus on 150 hehtaaria. Siitä 90 hehtaaria on merestä täytettävää uutta aluetta, jonka täyttöön tarvitaan 12 miljoonaa kuutiometriä erilaisia maamassoja. Pääosan täyttöaineesta satama saa satamatien ja -radan tunneleiden louhinnoista.

Sataman mantereen puoleista aluetta rajoittaa aita. Alueen sisällä rajoittavia aitoja ei käytetä. Satama-alueelle pääsyn mahdollistaa kaksi porttia. Raskas- ja rautatieliikenne keskittyy portille A. Henkilö- ja huoltoliikenne portille B.

Porteille keskittyy valvomotoimintoja ja ympärivuorokautista liikenteen ja materiaalivirtojen valvontaa. Jalankulkua tai polkupyöräliikennettä ei satama-alueella sallita. Henkilökuljetukset tapahtuvat sisäisesti pikkubusseilla. Satama-alueen raideyhteyksiä ei sähköistetä, radan sähköistys loppuu ratapihalle. Junat satama-alueella toimivat dieselveitureilla.

2.4.2 Logistiikka-alue

Vuosaaren sataman viereen rakennetaan kiinteästi sataman toimintoihin liittyvä logistiikka-alue, jonka pinta-ala on yhteensä noin 35 ha. Logistiikka-alue

muodostuu riveittäin sijoitetuista ns. läpivirtaustermiinaaleista ja varastoista sekä niiden välisistä liikennevyöhykkeistä. Tavara kuljetetaan satamakoneilla suoraan satamasta terminaaliin, jossa tapahtuu jatkokäsittely. Sen jälkeen tavara lastataan joko maantie- tai rautatiekuljetuksiin. [4.]

2.4.3 Meriportin yritysalue

Sataman yhteyteen Meriportin alueelle (pinta-ala n. 25 ha) rakennetaan yritysalue. Alue rajoittuu etelässä puistoon ja venesatamaan ja lännessä golfkenttään. Meriportin yritykset voivat hyödyntävät sataman ja merenkulun läheisyyttä sekä sataman erinomaisia liikenneyhteyksiä.

Yritysalueelle on jo sijoittumassa kaksi merkittävää satamaan ja merenkulkuun liittyvää toimijaa: Arktisen merenkulun tutkimuskeskus sekä ABB:n Marine-yksikkö. Lisäksi Oy Paulig Ab rakentaa uuden paahtimon hallinto- ja oheistiloineen. Meriportin yritysalueelle on rakennusoikeutta 91 000 kerrosneliömetriä (k-m²). [5.]

2.5 Satama-alueen liikenne-yhteydet

2.5.1 Meriväylä

Vuosaaren satamaan johtaa helposti navigoitava, lähes suora meriväylä, joka on 32 kilometriä pitkä. Uusi väylä alkaa Helsingin majakalta kuten nykyistenkin tavarasatamien väylät. Se kulkee Itätoukin, Eestiluodon, Kuiva-Hevosen ja Krokholmenin länsipuolitse Pikku-Niinisaaren ja Mölandetin välistä uuteen satamaan.

Meriväylän minimileveys on 200 metriä ja varmistettu minimisyvyys 12,5 metriä, mikä vastaa 11,0 metrin kulkusyvyyttä. Väylä on kaksikaistainen lukuun ottamatta noin 10 kilometrin osuutta, jonka puoliväliin tulee ankkurointialue kohtaamispaikaksi.

Väylän merkinnässä käytetään sekä kiinteitä että kelluvia turvalaitteita. Linjamerkit sijoitetaan Granlandetin ja Mölandetin saariin. Ulompana väylä merkitään matalikoille sijoitettavilla kiinteillä reunamerkeillä. Itätoukkiin tulee sektoriloisto ja Racon. Eestiluodon pohjoispuolen ja sataman välisellä osuudella väylämerkinnässä käytetään poijuviittoja ja viittoja. [6.]

2.5.2 Maayhteydet

Satamatie ja -rata liittävät Vuosaaren sataman valtakunnan pääliikenneverkoihin, jolle ohjataan sataman tavaraliikenne. Nykyisten satamien aiheuttama rekkaliikenne, noin 3 600 rekkaa/vrk, siirtyy Helsingin keskustasta ja Kehä I:ltä raskaalle liikenteelle paremmin soveltuville väylille. Uusi satamarata puolestaan mahdollistaa rautateitse kulkevan rahdin määrän kasvattamisen nykyisestään.

Satamarata

Vuosaaren satamarata on yksiraiteinen ja sähköistetty tavaraliikennerrata, jolla junien nopeus on enintään 80 km/h. Satamaradalla luodaan junayhteys satamasta Helsinki-Riihimäki -pääradalle. Satamaradan pituus on 19 km, josta tunneliosuudet ovat yhteensä n. 14 km.

Satamarata lähtee sataman ratapihalta, josta se johdetaan Porvarinlahden yli sillalla. Sen jälkeen rata läpäisee Natura 2000 -alueella sijaitsevan Labbackan mäen 0,6 km pitkässä tunnelissa. Labbackan tunnelin jälkeen rata kulkee maan päällä Satamatien ja Kehä III:n rinnalla Porvoonväylän liittymään, josta alkaa toinen satamaradan tunneliosuus, Savion rautatietunneli.

Savion tunneli on 13,5 km pitkä ja se päättyy Keravan Saviolla, jossa satamarata liittyy päärataan. Satamaradan liikenne on sataman käynnistysvaiheessa noin 5 junaa/vrk molempiin suuntiin ja n. 10 junaa/vrk, kun satama toimii täydellä kapasiteetilla. Vuosaaren satamaradan rakentaminen alkoi elokuussa 2003 ja työt valmistuvat vuonna 2008.

Satamatie

Vuosaaren sataman maantieyhteys, kaksi-ajoratainen satamatie, rakennetaan satamasta Kehä III:n itäpäähän. Satamasta lähdettyään satamatie alittaa Porvarinlahden ja Labbackan mäen 1,5 km pitkässä tunnelissa, joissa molemmille liikennesuunnille on oma erillinen tunnelinsa. Tämän jälkeen satamatie nousee maanpinnalle Österängenin alueen eteläpäässä, alittaa Itäväylän ja jatkuu siitä eteenpäin Kehä III:na. [7.]

3 RELESUOJAUSTEKNIikka

Sähköverkossa tapahtuvia vika- ja häiriötilanteita, kuten oikosulkuja, maasulkuja, ylikuormituksia, yli- ja alijännitteitä ja johdinkatkoksia varten on voimalliset, sähköasemat ja kytkinlaitokset varustettava suojalaitteilla, joista osan muodostavat suojareleet.

Releet tarkkailevat sähköverkon tilaa ja tarpeen vaatiessa suorittavat tietyn ohjauksen tai indikoinnin samassa tai toisessa sähkönjakelujärjestelmässä. Releiden ja verkon valvontajärjestelmän tulee olla sekä luotettava että toimia varmasti. Vian havaitsemattomuus tai releen aiheeton toiminta saattaa johtaa vakaviin seurauksiin: ihmisiä tai eläimiä joutuu vaaralle alttiiksi, omaisuusvahinkoja ja laitevaurioita syntyy, sähkön laatu heikkenee.

3.1 Relesuojauksen edellytykset

Relesuojaukselta edellytetään seuraavaa:

- Relesuojauksen on katettava aukottomasti koko suojattava järjestelmä.
- Relesuojauksen toiminnan on oltava riittävän nopeaa ja tarkkaa.
- Toiminnan tulisi olla selektiivinen, niin että vian sattuessa vain tarvittava osa verkosta jää käyttökeskeytyksen piiriin.
- Relesuojauksen on oltava käyttövarma ja riittävän yksinkertainen.
- Relesuojaus on voitava koestaa ja huoltaa käytön aikana ilman käyttökeskeytystä.

3.2 Selektiivisyys

Suojareleet ja niiden ohjaamat katkaisijat muodostavat suoja-alueita. Jos vierekkäiset suoja-alueet osaksi peittävät toisensa, on suojaus aukoton. Suojaus on absoluuttisesti selektiivinen, kun se toimii vain omalla suoja-alueellaan tapahtuvissa vioissa. Aikaan perustuvaa selektiivisyyttä sanotaan aikaselektiivisyydeksi, ja vastaavasti puhutaan virtaselektiivisyydestä. Suoja-alueita voivat olla esimerkiksi johdot, muuntajat generaattorit ja moottorit. Selektiivisyys on ominaisuus, jonka avulla rele havaitsee vian suoja-alueella mutta ei toimi jos vikaa ei ole tai vika on suoja-alueen ulkopuolella. [8, s.15.]

3.3 Yleisesti esiintyvät suojareleetyypit

3.3.1 *Ensiö- eli primäärireleet*

Ensiöreleille tunnusomaista on, että

- ne ovat ensiöpiiriin mekaanisesti kytkettäviä suojareleitä
- ne eivät tarvitse apuenergiaa
- ne ovat mekaanisesti jäykkiä ja epätarkkoja.

Ensiöreleiden toiminta perustuu releen läpi kulkevan virran aiheuttamaan sähkömagneettikentän muutokseen, joka aiheuttaa välitangon avulla katkaisijan mekaanisen auki-ohjauksen. Ensiöreleitä käytetään nykyään pääasiassa vain varasuojina.

3.3.2 *Sähkömekaaniset toisioreleet*

Sähkömekaaniset toisioreleet ovat ensiöpiiriin mittamuuntajien välityksellä kytkettyjä suojareleitä.

Toisioreleille tunnusomaista on, että

- toisioreleitä on mahdollista koestaa käytön aikana
- osa releistä ei tarvitse apuenergiaa mutta laukaisupiiri kuitenkin vaatii sen lähes aina.

Sähkömekaaniset toisioreleet ottavat kaiken tarvitsemansa energian mittamuuntajista. Niiden taakka saattaa silloin muodostua suureksi, josta on haittaa erityisesti virtamuuntajien toistokyvyille etenkin silloin, kun vikavirta sisältää tasakomponentin.

Mekaaniset releet ovat tyypiltään tehollisarvoa mittavia koneistoja, joille on ominaista liikkuvien osien hitaus. Näillä menetelmillä ei ole mahdollista mitata vaihtosuureiden hetkellisarvoja ja siten nopeuttaa toimintaa.

Mekaanisten releiden asettelutarkkuudet ovat moniin nykyisiin sovelluksiin riittämättömiä ja niitä on vaikea saada riittävän herkiksi. Maasulkusuojausta varten on rakennettu erikoisherkkiä releitä. Säännöllisesti huollettuna mekaaninen rele toimii suhteellisen luotettavasti, ja vie vielä vuosikymmeniä etä kaikki mekaaniset releet ovat poistuneet käytöstä.

3.3.3 *Tasasuuntaajareleet*

Tasasuuntaajareleet ovat eräänlainen väliporras mekaanisten ja staattisten releiden välillä. Niissä mittaososan muodostaa herkkä kiertokäämikela. Kiertokäämikelan ollessa tasavirtakela, on vaihtovirta tasasuunnattava. Tasasuuntaussillan eteen sijoitetaan sopivasti kyllästyvä välimuuntaja kiertokäämikelaa suojaamaan. Kiertokäämikelan kosketin ohjaa varsinaista lähtörelettä. Tasasuuntausreleitä käytetään mm. differentiaali-, vinokuormitus- ja distanssireleissä.

3.3.4 *Staattiset releet (elektroniset releet)*

Staattisille releille tunnusomaista on, että

- niiden toiminta perustuu elektroniikan käyttöön releen omissa mittaussignaalin muokkauselimissä
- releet ovat melko tarkkoja
- niissä on laajat asettelualueet eli releessä on hyvä dynamiikka.

Staattiset releet ottavat apuenergiansa erillisestä apusähköliitännästä joten mittapiirin kuormitus jää vähäiseksi. Koska rele ottaa apuenergiansa erillisestä lähteestä, voidaan lähtöreleenä käyttää apurelettä, jossa on riittävästi koskettimia sekä laukaisua että hälytystä varten eikä erillisiä hidastusta lisääviä välireleitä tarvita. Varsinkin nopeissa releissä tämä on tärkeää sillä välireleet saattavat hidastaa suojausta 20 - 40 ms, mikä merkitsisi esim. ylivirtareleen pikalaukaisun tai differentiaalireleen tapauksessa toiminta-ajan kaksinkertaistumista.

Staattiset releet tulivat markkinoille 1960-luvulla, ja ne voidaan toteuttaa joko analogia- tai digitaalitekniikkaa käyttäen.

3.3.5 *Numeeriset releet*

80-luvulla markkinoille tulivat ensimmäiset sovellukset numeerisista releistä. Mikroprosessorien myötä digitaalinen signaalinkäsittely syrjäytti aiemman staattisten suojarleiden toteutustekniikan.

Toisen sukupolven numeeriset releet alkoivat välittää kosketintoimintojen ohella myös muuta tietoa. Tiedon kulku niissä voi olla kaksisuuntaista: releeltä voidaan lukea mittaus-, tila- ja asetteluarvoja, ja rele voi vastaanottaa ohjaus ja asettelutietoja.

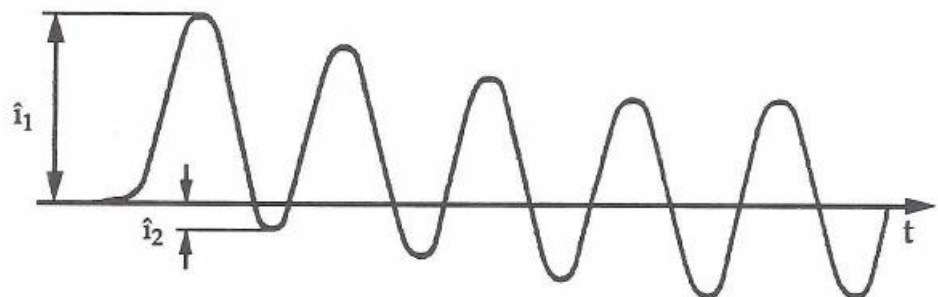
Parametreja voidaan asettaa PC:llä ja siirtää siitä suojarieleeseen sarjaliittymän kautta. Releyksikön monipuolisuudesta johtuen niitä nimitetäänkin usein kennotermiinaaleiksi.

Toisen polven numeerisille releille tunnusomaisia piirteitä ovat

- häiriötallennus- ja kunnonvalvontaominaisuudet
- PC:n käyttömahdollisuus ja joustava ohjelmoitavuus
- väyläliityntämahdollisuudet
- isot näytöt, helpot ja selkeät käyttäjäliitynnät.

Numeerisilla releillä päästään täysin eroon epäsymmetrioiden suojausta haittaavista vaikutuksista (esim. muuntajan kytkentävirtasysäys tai johtimien katkeamiset) käyttämällä huipusta huippuun mittaustapaa.

Rele mittaa sekä positiivisen että negatiivisen puolijakson huippuarvon suuruuden ja laskee näistä keskiarvon. Tällä menetelmällä päästään eroon myös releen yliulottumasta epäsymmetrisen oikosulkuvirran tapauksessa. Yli- ja aliulottumalla tarkoitetaan releen virheitä vian etäisyyden määrittämisessä.



Kuva 1. Huipusta huippuun -mittaus [8, s. 28]

3.4 Tiedonkeruu ja tietoliikenne

Prossoritekniikka on tehnyt mahdolliseksi toisiokojejärjestelmän käyttämisen hajautettuna. Jokainen lähtö on varustettu täysin itsenäisesti toimivalla kennotermiinaalilla. Kennotermiinaalit tekevät itsenäisesti paikalliset suojaus- ja automaatiotoiminnot. Nämä muodostavat toisiokojejärjestelmän johtotason. Johtotason laitteet toimivat tiedonkerääjinä ylemmän eli asematason laitteille.

Asematason laitteet suorittavat ylemmän tason toimintoja kuten syötönvaihto, kuormanpudotus ja tapahtumaraportointi. Johtotason laitteet liitetään nykyisin väylätekniikalla isäntäyksikköön, joka voi olla erityinen raportointiyksikkö, kaukokäytön ala-asema tai muu käytönvalvontajärjestelmä. Käytännössä puhutaan usein SCADA:sta (*Supervisory Control And Data Acquisition*).

Isäntäyksikkö kyselee orjilta aikamerkinnällä varustettuja tapahtumatietoja säännöllisinä kiertokyselyinä. Tiedot järjestellään, tulostetaan paikallisesti tai lähetetään eteenpäin. Yleensä kysellään jatkuvasti vain tapahtumatietoja, muita tietoja kysellään tarvittaessa.

3.5 Tärkeimmät suojarelelajit

3.5.1 Virtareleet

Virtareleet ovat yksisuurereleitä ja toimivat seuraavilla periaatteilla.

Hetkellinen ylivirtarele

Rele toimii ilman lisäviivettä, kun sen läpi kulkeva virta ylittää releeseen asetellun toiminta-arvon. Hetkellisiä ylivirtareleitä käytetään lähioikosulkujen havaitsemiseen.

Vakioaikaylivirtarele

Yhdistämällä hetkellinen ylivirtarele ja aikarele saadaan vakioaikaylivirtarele, jonka toiminta-aikaa voidaan asetella. Toiminta-aika on riippumaton ylivirran suuruudesta. Vakioaikaylivirtareleitä käytetään rakennettaessa aikaselektiivisiä portaita.

Käänteisaikaylivirtarele

Releen toiminta on sitä nopeampaa, mitä enemmän virta ylittää releeseen asetellun toiminta-arvon. Käytetään yhteiskäytössä sulakkeiden kanssa. Käänteisaikaylivirtareleillä saadaan lyhennettyä vikavirtojen kestoajoja muihin releisiin verrattuna.

Standardit IEC 60255-3, IEC 60255-4 ja BS 142 määrittelevät neljä käänteisaikatoimintakäyrästä:

- Normal inverse
- Long time inverse
- Very inverse
- Extremely inverse.

Käänteisaikakäyrien mukainen laukaisuaika voidaan laskea kaavasta 1:

$$t = \frac{k \cdot \beta}{\left(\frac{I}{I >}\right)^\alpha - 1} [s] \quad (1)$$

missä k on aseteltava aikakerroin, I vaihevirran arvo, $I >$ virta-asettelu, α ja β ovat toimintakäyräkohtaiset vakiot.

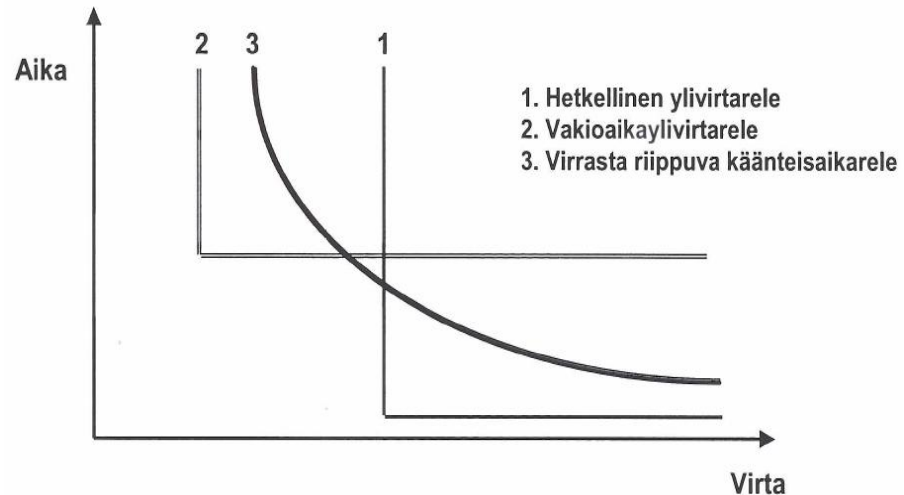
Standardien mukaan *normal*, *very* tai *extremely inverse*-toimintakäyriä käytettäessä suojauksen tulee havahtua viimeistään, kun mitattu virta ylittää 1,3-kertaisesti virta-asettelun. Mikäli käytetään *long time inverse*-toimintakäyrää, havahtumisen tulee tapahtua 1,1-kertaisella virta-asettelulla. [9, s. 218.]

Taulukko 1. Käänteisaikareleen toimintakäyräkohtaiset vakiot

	α	β
Normal inverse	0,02	0,14
Very inverse	1,0	13,5
Extremely inverse	2,0	80,0
Long time inverse	1,0	120,0

Lämpöreleet

Releisiin rakennetaan suojattavaa kohdetta kuvaava lämpenemismalli, jonka avulla ne pyrkivät matkimaan suojattavaa kohdetta. Niiden lämpenemisaikavakioita voidaan muuttaa, ja niitä voi olla useita yhdessä releessä. Käytetään etupäässä generaattoreiden ja moottoreiden yhteydessä.



Kuva 2. Ylivirtareleiden toiminta-aikoja virran funktiona [10]

Ylivirtareleiden oikea asettelu vaatii usein niiden sijaintipaikalla esiintyvien suurimman ja pienimmän mahdollisen 3-, 2- ja 1-vaiheisen oikosulkuvirran tuntemista. Ylivirta-aikareleet pyritään asettelemaan muutosoikosulkuvirran I_k' mukaan. Nopeat, hetkelliset releet asetellaan alkuoikosulkuvirran I_k'' mukaan.

3.5.2 Alijännitereleet

Alijänniterele toimii, kun jännite alittaa sen toiminta-arvon. Niitä käytetään erityisesti osana moottoreiden suojausta. Moottoreille olisi tuhoisaa, jos jännite häviäisi tai pienenesi, ja moottori jäisi silloin kytketyksi. Jännitteen jälleen palautuessa syntyy oikosulkuun verrattavissa oleva virtasysäys.

Alijännitereleissä on toimintajännite ja aikahidastus aseteltavissa, ettei aiheutuisi tarpeettomia käyttökeskeytyksiä lyhytaikaisista jännitteenvaihteluista. Kehittyneissä alijännitereleissä aikahidastus riippuu myötäjärjestelmän jännitteen suuruudesta.

3.5.3 Ylijännitereleet (jännitteennousureleet)

Ylijänniterele toimii jännitteen ylittäessä asetellun arvon. Ylijännitereleitä käytetään laajasti maasulkujen havaitsemiseen, useimmiten aikahidastettuna.

3.5.4 Taajuusreleet

Alitaajuusreleitä käytetään kuormien irtikytkemiseen esim. valtakunnallisessa tehonvajaussuojauksessa. Ylitaajuusreleitä käytetään generaattoreiden suojauksessa.

3.5.5 Suunta- ja tehoreleet

Suunta- ja tehoreleet mittaavat kohteen jännitteen ja virran hetkellisarvoja, sekä toisinaan näistä johdettuja tehoja.

Suunnatun ylivirtareleen muokkauselimessä muodostetaan virran sekä virran ja jännitteen välisen vaihesiirtokulman suuruuteen verrannolliset suureet. Rele havahtuu, kun releen mittaama virta saavuttaa asetteluarvon ja vaihesiirtokulma on asetellulla alueella. Suunnattuja ylivirtareleitä käytetään silmukkaverkkojen ylivirta- ja oikosulkusuojina.

Maasulun suuntareleet mittaavat suojattavan kohteen nollajännitteen ja nollavirran hetkellisarvoja. Releen muokkauselimessä muodostetaan nollavirran ja -jännitteen sekä niiden välisen vaihesiirtokulman suuruuteen verrannolliset suureet. Rele havahtuu kun sen mittaama nollavirta ja -jännite saavuttavat asetellun arvon, ja nollajännitteen ja -virran välinen vaihesiirtokulma on asetellualueella.

Takatehorele mittaa suojattavan kohteen verkosta ottaman pätötehon hetkellisarvoa ja sen suuntaa. Takatehorelettä voidaan käyttää esim. estämään generaattoria käymästä moottorina.

3.5.6 Epäsymmetriareleet

Epäsymmetrisen kolmivaihejärjestelmän kuormitusvirroista voidaan erottaa ns. vastakomponentti. Vastakomponentti aiheuttaa koneissa päävuota vastaan pyörivän magneettivuon, joka synnyttää pyörintää vastustavan vääntömomentin. Tästä on seurauksena tärinää ja paikallista ylikuumenemista. Epäsymmetriaa eli vinokuormituksia esiintyy myös maasuluissa ja johtimien katkeamisissa.

Epäsymmetriasuojat perustuvat erikoiskytkentöihin, joiden avulla kolmivaihejärjestelmän virroista ja jännitteistä erotetaan vastakomponentti. Vastakomponentti laitetaan vaikuttamaan virta- tai jännitereleeseen, joka vaaratilanteessa aiheuttaa koneen verkosta irtautumisen.

3.5.7 *Vertoreleet*

Vertoreleet sopivat muuntajien, generaattoreiden, johtojen ja kiskostojen suojaamiseen. Ne vertailevat suojausalueensa päissä mittaamiaan yhtä tai useampaa suuretta. Ilman varsinaista apujohtoyhteyttä toimivia vertoreleitä kutsutaan differentiaalireleiksi.

Vertoreleet muodostavat absoluuttisesti selektiivisen suojauksen, ja tarvitsevat muita releitä varasuojikseen. Toisaalta vertoreleet eivät voi olla varasuojina muille releille.

Differentiaalireleet

Differentiaalireleet soveltuvat muuntajien, generaattoreiden, kiskostojen suojaukseen. Suojausalueella on vika jos virtojen amplitudit ja tai vaihekulmat eroavat toisistaan riittävästi. Differentiaalireleet ovat tyypillisesti vakavoituja kuormitusvirran suhteen ts. mitä suurempi on kuormitusvirta, sitä suurempi erovirta vaaditaan laukaisuun. Differentiaalisuojauksessa on kiinnitettävä erityistä huomiota virtamuuntajien valintaan.

Apuyhteysvertoreleet

Johtojen differentiaalisuojauksessa etäisyydet ovat pitkiä, jolloin tarvitaan apuyhteys johdon päiden välille. Apuyhteys voi olla esim. suojattu ohjauskaapeli, viestikaapeli, optinen kaapeli, radiolinkki tai suurtaajuusviestiyhteys.

3.5.8 *Distanssireleet*

Etäisyys eli distanssireleet mittaavat sijoituspaikkansa ja vikapaikan välisen impedanssin sijoituspaikassaan esiintyvien virtojen ja jännitteiden avulla. Releet asettelevat toiminta-aikansa tämän tuntemansa arvon perusteella sitä lyhyemmäksi mitä lähempänä vikapaikkaa ne sijaitsevat.

Distanssireleitä käytetään silmukoidun verkon selektiiviseen suojaukseen. Distanssireleistys ei vaadi viestiyhteyttä naapuriasemien välillä.

3.6 Mittamuuntajat

Mittamuuntajat ovat jännitteen ja virranmittaukseen tarkoitettuja erikoisrakenteisia laitteita, joiden pääasiallisia tehtäviä sähköjakeluverkossa ovat

- mittauspiirin erottaminen päävirtapiiristä
- mitta-alan laajentaminen, jolloin mitta- ja suojalaitteiden standardointi on mahdollinen
- toisiokojeiden suojaaminen ylikuormitukselta
- mittalaitteiden varsinaisesta mittapistestä etäälle sijoittamisen mahdollistaminen.

Ideaalisissa mittamuuntajissa nimellismuuntosuhde määritellään ensiö- ja toisiosuureiden tai johdinkierroslukujen suhteenä. Todellisissa mittamuuntajissa tyhjäkäyntivirta ja hajaimpedanssit aiheuttavat virhettä mittaustulokseen.

Näiden virhetekijöiden vaikutukset näkyvät mittamuuntajilla

- virtavirheinä
- jännitevirheinä
- kulmavirheinä.

Mittamuuntajien ominaisuuksia tutkittaessa voidaan käyttää tavallisen muuntajan sijaiskytkentää.

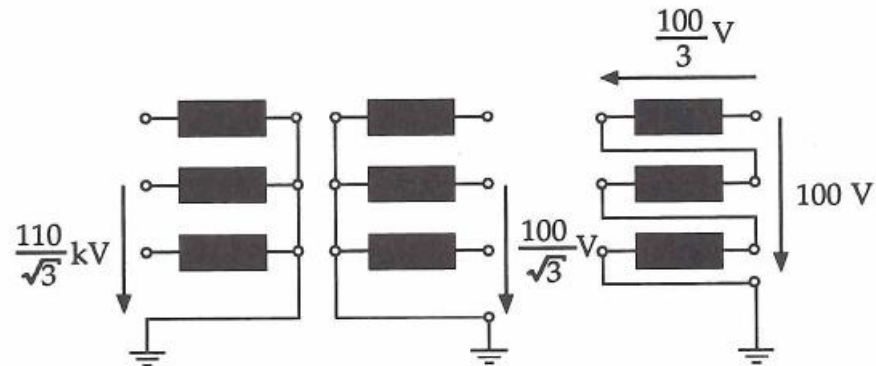
3.6.1 Jännitemuuntajat

Jännitteen mittaustapoja käytännön sovelluksissa ovat

- magneettinen jännitemuuntaja
- kapasitiivinen jännitteenjakaja
- kapasitiivinen jännitemuuntaja (yhdistää kaksi edellistä).

Magneettiset jännitemuuntajat on yleensä tehty niin että niissä on ainoastaan yksi rautasydän, joka palvelee sekä mittaus että suojaustarkoitusta. Toisiossa on joko yksi tai kaksi käämiä, useimmiten yhteinen mittaus ja suojauskäämi. Maasulkusuojausta eli maasulkujännitteen mittaamista varten toisiossa saattaa olla myös avokolmiokäämitys.

Kuvassa 3 on esitetty tyypillinen jännitemuuntajan käämitystoteutus, jossa on paitsi mittaus- ja suojauskäämitys, niin myös yksivaiheisista jännitemuuntajista muodostettu avokolmiokytkentä.



Kuva 3. Jännitemuuntaja, jossa on vaihekäämien lisäksi avokolmiokäämitys [8, s. 87]

Jännitemuuntajan tärkeimmät teknilliset arvot ovat

- nimelliseristystaso, joka määrittää suurimman käyttöjännitteen, eristyskoejännitteen ja syöksyjännitekestoisuuden avulla (1,2/50 μ s)
- nimellisjännitekerroin, jonka tulo mitoitusensiöjännitteen kanssa ilmoittaa suurimman ensiöjännitteen, jolla muuntajaa on voitava käyttää tietyn ajan. Suojaustarkoituksiin valmistetulta jännitemuuntajalta edellytetään, että jännitemuuntaja pysyy tarkkuusluokassaan nimellisjännitekertoimen suuruiseen ylijännitteeseen asti
- nimellisensiöjännite U_{pn} , jotka on standardoitu IEC 60038 (1938) tai SFS 2664 (1998)
- nimellistoisiojännite U_{sn} , joka useimmin on 100 V tai 100:3 V
- nimellistaakka S_n , joka ilmoittaa suurimman kuorman jolla jännitemuuntajaa voidaan kuormittaa sen pysyessä tarkkuusluokassaan. Mitoitustaa-kan standardiarvot ovat: 10 - 15 - 25 - 30 - 50 - 75 - 100 - 150 - 200 - 300 - 400 - 500 VA. Nimellistaakka on ilmoitettu $\cos\phi$ arvolla 0,8 ind. Nimellistaakkaa valitessa on hyvä huomioida että mittamuuntaja on tarkimmillaan taakan ollessa (0,6...0,65* S_n)

- tarkkuusluokka, joka määrittää rajat joita mittausjännitemuuntaja ei saa ylittää ensiöjännitteen vaihdella 80...120 % nimellisjännitteestä (U_n) ja taakan vaihdella 25...100 % nimellistaakasta (S_n) (tehokerroin 0,8 ind). Suojaustarkoituksiin valmistetun muuntajan on oltava luokissa 3P tai 6P
- jännitevirhe, jolla tarkoitetaan toisiojännitteen ja toisioon redusoidun ensiöjännitteen prosentuaalista eroa. Jännitevirhe voidaan laskea kaavasta:

$$f_u = \frac{u_2 - u'_1}{u'_1} \cdot 100\% \quad (2)$$

missä f_u on jännitevirhe prosentteina, u_2 on toisiojännite ja u'_1 on toisioon redusoitu ensiöjännite

- kulmavirhe, joka on toisio- ja ensiöjännitteen välinen kulmaero, ja joka on määritelty positiiviseksi kun jännitteenosoitin on virtaosoitinta edellä. Kulmavirhe voidaan laskea kaavasta:

$$\delta_u = \arg(\underline{u}_2) - \arg(\underline{u}'_1) \quad (3)$$

missä δ_u on kulmavirhe radiaaneina.

Taulukossa 2 on esitetty mittausjännitemuuntajien tarkkuusvaatimukset (IEC 186).

Taulukko 2. Mittausjännitemuuntajien jännite- ja kulmavirheiden rajat

Tarkkuusluokka	Jännitevirhe [%]	Kulmavirhe [min]
0,1	0,1	5
0,2	0,2	10
0,5	0,5	20
1	1	40
3	3	

Taulukossa 3 on esitetty suojausjännitemuuntajien tarkkuusvaatimukset (IEC 186A).

Taulukko 3. Suojausjännitemuuntajien jännite- ja kulmavirheiden rajat

Tarkkuusluokka	Jännitevirhe [%]	Kulmavirhe [min]
3P	3	120
6P	6	240

Kippivärähtely

Kippivärähtely eli ferroresonanssi syntyy sähköverkossa epälineaarisen tyhjäkäynti-induktanssin ja kapasitanssin välille.

Kippivärähtelyn vaimentamiseen käytetään avokolmioon liitettyä vaimennusvastusta. Sen tehon on oltava n. 20...30 W jännitemuuntajan rautasydämien yhteismassan kilogrammaa kohti 100 % maasulussa.

3.6.2 *Virtamuuntajat*

Virran mittaaminen on jännitteen mittaamista haasteellisempaa, sillä virta vaihtelee huomattavasti jännitettä enemmän. Vikatilanteen ja normaalin käyttötilanteen virtojen suhde voi olla useita kymmeniä jopa satoja, kun jännitteiden vastaava luku on usein pienempi kuin yksi ja maasuluissakin vain maasulkukertoimen suuruinen.

Virtamuuntajan tärkeimmät teknilliset arvot ovat

- terminen kestovirta I_{th} (tehollisarvo), joka ilmoittaa suurimman ensiövirran minkä virtamuuntaja kestää termisesti vahingoittumatta 1s ajan toisiokäämit oikosuljettuna
- dynaaminen kestovirta I_{dyn} (huippuarvo), joka ilmoittaa kuinka suuren ensiövirran voimavaikutukset mittamuuntaja kestää vahingoittumatta toisiokäämit oikosuljettuna
- eristystaso, joka määrittää suurimman käyttöjännitteen, eristyskoejännitteen ja syöksyjännitekestoisuuden avulla (1,2/50 μ s)
- nimellisensiovirta I_{pn} , minkä standardoidut nimellisarvot ovat 10 - 12,5 - 15 - 20 -25 - 30 - 40 - 50 - 60 - 75 A sekä näiden kymmenpotenssikerrannaiset ja -osat. Suositeltavat arvot on alleviivattu
- nimellistoisiovirta I_{sn} , jonka standardiarvot ovat 1 A, 2 A ja 5 A, ja joista suositeltavat arvot ovat 1 A ja 5 A. Pitkillä suojarieleen ja virtamuuntajan välisillä yhdysjohdoilla 1 A: n virta on suositeltavaa mittajohtimista aiheutuvan taakan pienentämiseksi
- nimellistaakka S_n , jolla tarkoitetaan suurinta kuormitusimpedanssia jolla virtamuuntajaa voidaan kuormittaa kyseessä olevassa tarkkuusluokassa. Tavallisesti nimellistaakka ilmoitetaan kuitenkin tehona (V A), joka on mitoitustaakka (Ω) kerrottuna nimellistoisiovirran (A) neliöllä. Mitoitustaakan standardiarvot ovat 2,5 - 5 - 10 - 15 ja 30 VA

- virtavirhe f_i , joka on toisiovirran ja toisiopuolelle redusoidun ensiövirran itseisarvojen prosentuaalinen ero. Virtavirhe voidaan laskea kaavasta:

$$f_i = \frac{I_2 - I'_1}{I'_1} \cdot 100\% \quad (4)$$

missä f_i on virtavirhe prosentteina, I_2 on toisiovirta ja I'_1 on toisioon redusoitu ensiövirta

- kulmavirhe, joka on ensiö- ja toisiovirran ajallinen vaihesiirtokulma. Se on positiivinen, jos toisiovirta on ensiövirran edellä. Kulmavirhe voidaan laskea kaavasta:

$$\delta_i = \arg(\underline{I}_2) - \arg(\underline{I}'_1) \quad (5)$$

missä δ_i on virtavirhe radiaaneina

- mittarivarmuuskerroin, jonka tulo nimellisensiövirran kanssa tarkoittaa sitä ensiövirran arvoa, jolla yhdistetty virhe on vähintään 10 %. Virtamuuntaja suojaaa siihen kytkettyjä mittareita ylivirroilta sitä paremmin, mitä pienempi mittarivarmuuskerroin on. Kertoimen arvoja ei ole standardisoitu. Käytännössä tavallisia arvoja ovat 5 ja 10
- tarkkuusrajakerroin, joka on mitoitustarkkuusrajavirran ja mitoitusensiövirran suhde. Tarkkuusrajavirta on puolestaan se ensiövirran arvo, jolla yhdistetty virhe on enintään 5 % luokassa 5P ja 10 % luokassa 10P. Yhdistetty virhe voidaan määrittää myös kyllästystilassa tarkasti kaavasta:

$$\varepsilon_c = \frac{100}{I_1} \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T (K_n i_2 - i_1)^2 dt} \% \approx \frac{I_0}{I_1} \cdot 100\% \quad (6)$$

missä I_1 on ensiön nimellisvirta, T jakson aika (20 ms), K_n on virtamuuntajan nimellismuuntosuhde, i_2 toisiovirran hetkellisarvo ja i_1 ensiövirran hetkellisarvo perustajuudella yhdistetyn virheen likiarvo saadaan kaavasta 7:

$$\varepsilon_c \approx \sqrt{f_i^2 + \delta_i^2} \quad (7)$$

missä f_i on virtavirhe suhteellisarvona ja δ_i kulmavirhe radiaaneina.

- ylimeritoituskerroin, joka kertoo, kuinka moninkertaiseksi tarkkuusraja-
kerroin on nostettava, ettei virtamuuntaja kyllästyisi tasavirtakomponentin
vaikuttaessa.

Taulukossa 4 on esitetty mittausvirtamuuntajien tarkkuusvaatimukset (IEC 185).

Taulukko 4. Mittausvirtamuuntajan virta- ja kulmavirheiden rajat

Tark- kuus- luokka	Virtavirhe [%] virralla I/In						Kulmavirhe [°] virralla I/In				
	0,01	0,05	0,20	0,5	1,00	1,20	0,01	0,05	0,20	1,00	1,20
0,1		0,4	0,2		0,1	0,1	15	8	5	5	
0,2		0,75	0,35		0,2	0,2	30	15	10	10	
0,2S	0,75	0,35	0,2		0,2	0,2	30	15	10	10	10
0,5		1,5	0,75		0,5	0,5	90	45	30	30	
0,5S	1,5	0,75	0,5		0,5	0,5	90	45	30	30	30
1,0		3,0	1,5		1,0	1,0	180	90	60	60	
3,0				3,0		3,0					
5,0				5,0		5,0					

Taulukossa 5 on esitetty suojausvirtamuuntajien tarkkuusvaatimukset (IEC 185).

Taulukko 5. Suojausvirtamuuntajan virta- ja kulmavirheiden rajat

Tarkkuusluokka	Virtavirhe [%]	Kulmavirhe [min]	Yhdistetty virhe [%]
5P	1	60	5
10P	3	-	10

Lineaarinen virtamuuntaja

Sähkövoimansiirrossa häiriösuojaus vaatii joskus virtamuuntajalta oikeaa virran muuntamista myös epäsymmetrisissä oikosulkuilanteissa ja releeltä toimintaa alle yhden jakson ajassa. Tähän päästään lineaarisella suojausvirtamuuntajalla ja elektronisella releellä. Linearisoidun virtamuuntajan rautasydämessä on yleensä ilmavälejä.

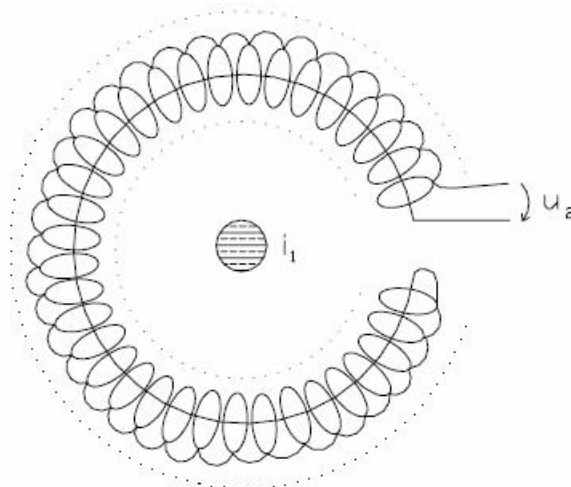
3.7 20 kV:n Virta- ja jännitesensorit

Digitaalitekniikan käyttö mittauksen ja suojauksen apuna sähköverkköjärjestelmissä antaa uusia mahdollisuuksia ja on muuttanut myös laitteille asetettavia vaatimuksia. Perinteisten mittamuuntajien tilalle ovat markkinoille tulleet uudet sensorit. Testitulokset osoittavat, että sensorien lämpötilariippuvuus, ylikuuluminen, taajuusvaste ja pitkän ajan stabiilius ovat riittävän hyviä korvatakseen perinteiset mittamuuntajat. [11.]

3.7.1 Virtasensorit

Virtasensoria käytetään sekä mittaukseen että suojaukseen. Virtasensorin toiminta perustuu ns. *Rogowskin* kelaan tai -käämiin. Sensori on lineaarinen läpi koko mittausalueen, sillä ei-magneettisen materiaalin ympärille tehdyn käämin ulostulo ei kyllästy suurillakaan virroilla. Lähtösignaalina on jännite, joka on verrannollinen aikariippuvalle virranmuutokselle. Jännite integroidaan digitaalisesti ja tuodaan ulos lähdöstä ja tästä saadaan mitattava virta.

Koska *Rogowskin* kela ei kyllästy, sitä voidaan käyttää virran mittaamiseen muutamasta ampeerista satoihin kiloampeereihin asti. Keskijänniteteoistoissa käytettävissä sensoreissa voidaan saavuttaa ± 0.5 % tarkkuus, jos sensorin sydän ja käämitys on valmistettu huolella. Epätarkkuutta aiheuttavat mm. lämpötilan vaihtelut, kokoonpanotoleranssi, muiden vaihevirtojen vaikutus ja ensiöjohtimen äärellinen pituus.



Kuva 4. Virtasensorin periaate: paluujohdin kulkee käämin sisällä toroidiputkessa [11]

Käämin läpi menevä virta indusoi jännitteen u_2 , joka on esitetty kaavassa 8:

$$u_2 = -\mu_0 NA \frac{dI}{dt} = H \frac{dI}{dt} \quad (8)$$

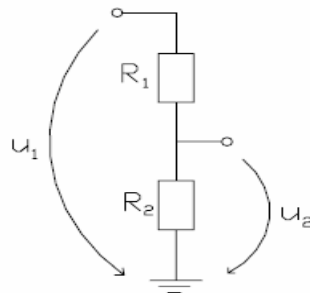
missä μ_0 on tyhjiön permeabiliteetti, N on käämin kierrosten lukumäärä, A on yhden kierroksen pinta-ala [m²] ja H on käämin herkkyys [Vs/A]. Toisiosta mitattu jännite u_2 on suuruudeltaan 150 mV, eli hyvin pieni verrattuna esim. rautasydämiseen virtamuuntajaan.

Käytännön tapauksissa *Rogowskin* käämi on suunniteltu 50 Hz:n taajuusalueelle. Sen käyttöalue vaihtelee kuitenkin muutamasta hertsistä aina 100 kHz asti. Mittaukseen, suojaukseen ja tehon laadun mittaukseen tämä on enemmän kuin tarpeeksi.

Alhainen signaalitaso voi olla ongelma erilaisissa EMI -ympäristöissä (*Electromagnetic Interference*, sähkömagneettinen häiriö) kuten keskijännitekytkinkojeistoissa, jos EMC (*Electromagnetic Compatibility*, sähkömagneettinen yhteensopivuus) näkökohtia ei ole otettu huomioon suunnittelussa ja testauksessa. [11.]

3.7.2 Jännitesensorit

Jännitesensorin periaatteena on resistiivinen jännitteenjako. Jännitesensori on kyllästymätön ja ulostulojännite on lineaarinen koko mittausalueella. Jännitesensorissa ei esiinny ns. kippivärähtelyä eli resonanssivärähtelyä, mitä esiintyy konventionaalisen jännitemuuntajan ja verkon kapasitanssien kesken. Jännitesensorin muuntosuhde on 10 000/1, jolloin 20 kV:n jännitteellä toisiojännitteeksi u_2 saadaan 2 V.



Kuva 5. Jännitesensorin periaate.[11]

Mitattava jännite u_2 saadaan jännitteenjakoperiaatteella kaavasta 9:

$$u_2 = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot u_1 \quad (9)$$

Sensorin tarkkuus on riippuvainen resistorin tarkkuudesta, tai siis tarkalleen ottaen jakosuhteen tarkkuudesta. Molemmat resistanssit saavat vaihdella, jos muutos on samaan suuntaan.

Jännitesensorin epätarkkuus johtuu usein

- resistanssin lämpötilakertoimesta
- resistanssin jännitekertoimesta (jännite, lämpötila)
- resistorin poikkeamasta
- hajakapasitanssista
- viereisen vaiheen vaikutuksesta (*cross talk*).

Normaalisti saavutetaan ± 0.5 %:n tarkkuus. Tulon mittauksessa minimivaatimus tarkkuudelle on ± 0.2 %. Tämä tarkkuus voidaan saavuttaa hyväksikäyttämällä seuraavia parannuksia. Lämpötilan tasaus ja resistanssin jännitteenkerroin voidaan hoitaa sopivilla materiaaleilla ja resistorin mekaanisella suunnittelulla.

Nimellinen lähtösignaalitaso on perinteisessä jännitemuuntajassa 100 V. Resistiivisessä jännitteen jakajassa lähtösignaalitaso on noin 1 V. Hyväksyttävät EMC-ominaisuudet pitää taata suunnittelemalla ja testaamalla systeemi todellisessa ympäristössä. [11.]

3.8 Muuntajasuojaus

Muuntajien suojauksen toteutus ja laajuus riippuu paljon muuntajan käyttökohteesta ja nimellistehosta. Pieniltä jakelumuuntajilta puuttuu usein suojarleistys kokonaan, ja niiden suojalaitteina käytetään pelkästään sulakkeita.

Tehomuuntajien suojaus

Tehomuuntajien suojaus voidaan jaotella seuraavasti:

- ylivirtasuojaus (muuntajan sisä- ja ulkopuoliset oikosulut)
- maasulkusuojaus (sisäiset maasulut)
- käämi- ja kierrossulkusuojaus (sisäiset oikosulut)
- ylikuormitussuojaus (ylikuormitus)
- ylijännitesuojaus (käyttötaajuiset ylijännitteet)
- kaasusuojaus (sisäinen kaasunkehitys)
- käämikytkinsuojaus (käämikytkimen viat).

3.9 Kiskosuojaus

Asemalla tapahtuva vika on suojauksen näkökulmasta kiskovika, jos se on virtamuuntajista katsottuna kiskon puolella, ja johtovika, jos se on johdon puolella. Virtamuuntajien sijainti määrittää, mitkä viat kuuluvat asema- ja mitkä johtovikoihin.

Koska sähköasemalla sattuvat laitevauriot saattavat aiheuttaa sähkönjakeluun hyvinkin pitkiä käyttökeskeytyksiä, tulee kiskosuojan toimia vain tilanteissa, joissa vika on kiskossa, mutta se ei saa toimia kiskon ulkopuolisissa vioissa.

Kiskosuojauksessa ylivirtavalvontaa täydennetään usein valokaarisuojalaitteilla, joiden avulla mitataan vikavirran muutosnopeutta sekä valokaaren tuottamaa valoa. Valokaarisuojalaitteilla saavutetaan suojauksen erittäin nopea toiminta.

Hyvältä kiskosuojaukselta edellytetään

- nopeaa toimintaa
- absoluuttista selektiivisyyttä
- käyttövarmuutta
- soveltuvuutta useisiin kiskojärjestelmiin
- muutos- ja laajennusmahdollisuutta.

3.10 Jakeluverkon johtosuojaus

Jakeluverkon johtosuojaus sisältää oikosulkusuojauksen, maasulkusuojauksen ja jälleenkytkentäreleistyksen (avojohtoverkossa). Jakeluverkon katsotaan alkavan 110 kV:n tasolta ja päättyvän 400 V:n pienjänniteverkkoon.

3.10.1 Oikosulkusuojaus

SFS 6001-standardi suurjännitesähköasennuksista veloittaa kohdassa 3.1.4.1 asennukset suunniteltavaksi, asennettavaksi ja koottavaksi kestämään turvallisesti oikosulkuvirtojen mekaaniset ja termiset rasitukset.

Edellä mainittu standardi tarkastelee neljää oikosulkutyyppiä: kolmivaiheinen oikosulku, vaiheiden välinen oikosulku, maasulku ja kaksoismaasulku. Standardi veloittaa asennukset suojattavaksi automaattisesti toimivilla laitteilla jotka kytkvät pois vaiheiden väliset oikosulut.

Verkon laitteiden mitoittamisessa, oikosulkusuojauksen suunnittelussa ja turvallisen käytön suunnittelussa on tunnettava oikosulkuvirrat eri tilanteissa ja eri osissa verkkoa.

Oikosulkuvirta

Oikosulkuvirrassa (kuva 6) on vaimeneva tasavirtakomponentti (A), jonka suuruus riippuu oikosulun syntyhetkestä ja vaimenemisnopeus piirin (R/X)-suhteesta, ja vaihtovirtakomponentti, jossa voi myös olla vaimeneva osa.

Alkuoikosulkuvirta I_k'' on symmetrisen oikosulkuvirran tehollisarvo vian alkuhetkellä. Se vastaa generaattoreiden reaktansseja vian syntyhetkellä. Vian aikana reaktanssit kasvavat, ja virta vaimenee jatkuvuustilan arvoon I_k .

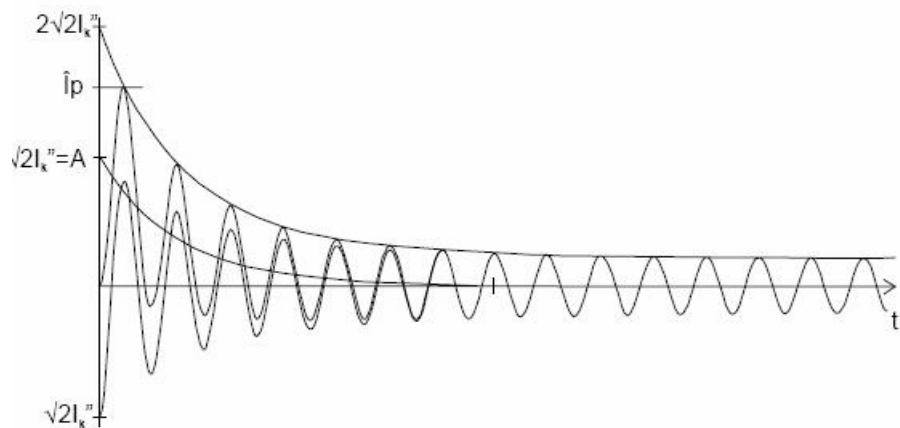
Oikosulkuvirran ensimmäisen huipun hetkellisarvo, kun otetaan huomioon myös tasavirtakomponentti, on ns. sysäysoikosulkuvirta \hat{i}_p , joka määrittää laitteistojen dynaamisen keston. Sysäysoikosulkuvirta saadaan kaavasta 10:

$$\hat{i}_p = \kappa \cdot \sqrt{2} \cdot I_k'' \quad (10)$$

missä κ on (R/X)-suhteen avulla käyrästäistä saatava sysäyskerroin. Arvon κ saa myös laskemalla kaavasta 11:

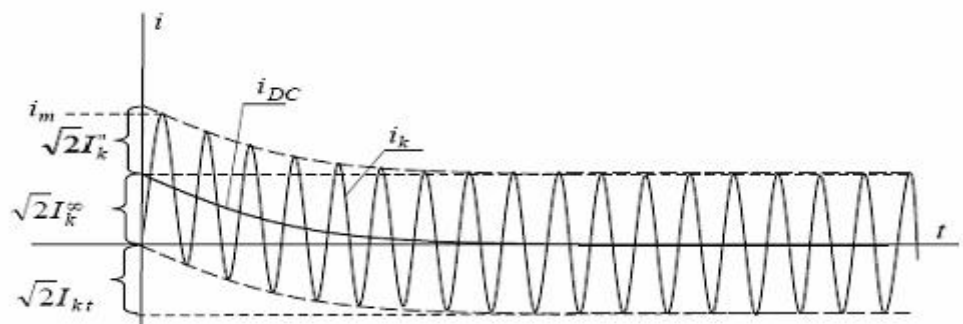
$$\kappa = 1,02 + 0,98e^{-3R/X} \quad (11)$$

Ekvivalenttisella termisellä oikosulkuvirralla I_{th} on sama virtateitä lämmittävä vaikutus, kuin oikosulkuvirralla. Useissa yhteyksissä käytettyä muutostilan oikosulkuvirtaa k' IEC-standardit eivät käytä.



Kuva 6. Symmetrisen- ja epäsymmetrisen oikosulkuvirran käyrämuodot [9]

Jakeluverkossa, jossa oikosulkuenergiaa kehittäviä elementtejä kuten generaattoreita tai suuria tahtikoneita ei ole lähellä pätee $I_k'' = I_k^\infty = I_{kt} = I_k$.



Kuva 7. Epäsymmetrisen oikosulkuvirran käyrämuoto jakeluverkossa

Oikosulkuvirtojen laskenta

Kolmivaihejärjestelmän oikosulkuvirran laskemista ja vaikutuksia käsitellään standardeissa IEC 60909-0, 60909-1, 60909-2, 60909-4, 60865-1, 60865-2 ja oikosulkuvirtojen vaikutusten laskentamenetelmiä esitetään standardissa EN 60865-1 ja voimakaapeleille standardissa IEC 60949.

Theveninin menetelmän yksivaiheisessa sijaiskytkennässä komponentit ja lähteet korvataan oikosulkuimpedansseilla ja vikapaikkaan sijoitettavalla ns. ekvivalenttisella jännitelähteellä cU_n , jossa U_n on vikapaikan käyttöjännite viikahetkellä ja c taulukon 6 mukainen kerroin.

Taulukko 6. IEC 60909-0 mukainen jännitekerroin c

Nimellis-jännite U_n	Jännitekerroin c	
	Maksimi oik. virta, c_{max}	Minimi oik. virta, c_{min}
$U_n < 1 \text{ kV}$	1,05 ¹ 1,10 ²	0,95
$U_n > 1 \text{ kV}$	1,10	1,00

1) Pienjänniteverkoissa, joissa jännitteen suurin sallittu toleranssi on +6 %
2) Pienjänniteverkoissa, joissa jännitteen suurin sallittu toleranssi on +10 %

Kolmevaiheisessa oikosulussa oikosulkuimpedanssi muodostuu myötäimpedansseista eli normaaleista verkon impedansseista ja kolmevaiheinen oikosulkuvirta saadaan kaavasta 12:

$$I_{k3}'' = \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot Z_1} \quad (12)$$

missä c on taulukon 6 mukainen kerroin, U_n syöttävän verkon jännite, ja Z_1 on myötäverkon impedanssi verkon vikapaikasta nähtynä.

Epäsymmetristen vikojen (1-vaiheinen oikosulku eli maasulku ja 2-vaiheinen oikosulku) aikana verkon jännitteet ja virrat eivät ole symmetrisiä ja tällöin laskennassa ei voida käyttää tavanomaista yksivaiheista sijaiskytkentää, vaan kutakin vaihetta on tarkasteltava erikseen. Epäsymmetristen tilojen käsittely helpottuu ottamalla käyttöön ns. symmetriset komponentit. Järjestelmä jakautuu ns. myötä-, vasta- ja nollajärjestelmin.

Myötäjärjestelmä on normaali symmetrinen kolmivaihejärjestelmä. Vastajärjestelmä on muuten sama, mutta vaihejärjestystä on vaihdettu. Nollajärjestelmässä taas kaikki vaihesuureet ovat itseisarvoiltaan yhtä suuria ja samanvaiheisia.

Jokaisen järjestelmän jännitekomponentit synnyttävät itsenäisesti oman virtakomponenttinsa Ohmin lain mukaisesti.

Kaksivaiheinen oikosulkuvirta ilman maakosketusta saadaan kaavasta 13:

$$I_{k2}'' = \frac{c \cdot U_n}{|\overline{Z}_1 + \overline{Z}_2|} \quad (13)$$

missä c on taulukon 6 mukainen kerroin, U_n syöttävän verkon jännite, \overline{Z}_1 on myötäkomponenttiverkon impedanssi ja \overline{Z}_2 on vastakomponenttiverkon impedanssi.

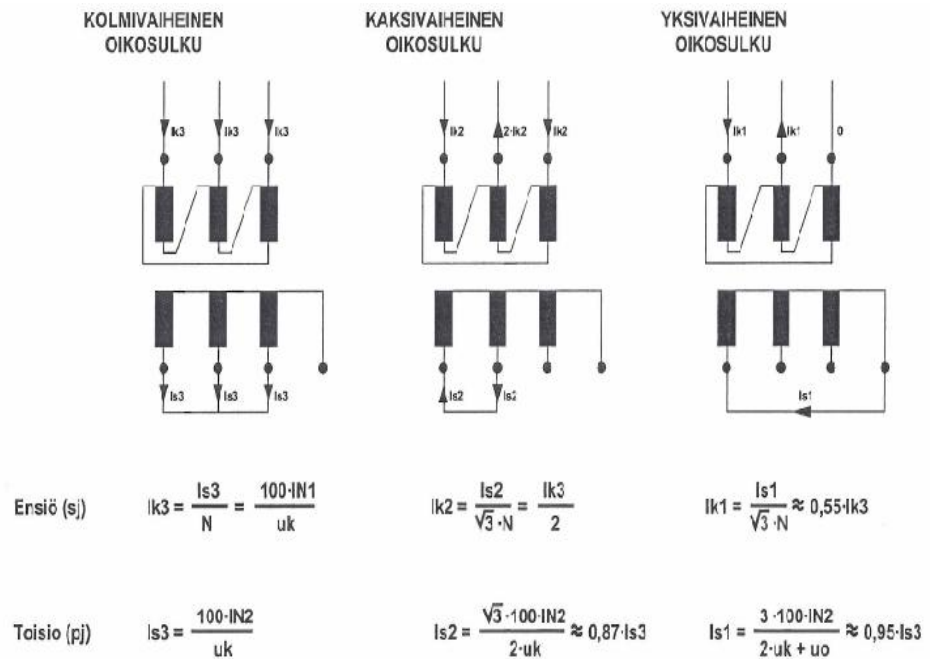
Vastaavasti yksivaiheinen oikosulkuvirta saadaan kaavasta 14:

$$I_{k1}'' = \frac{\sqrt{3} \cdot c \cdot U_n}{|\overline{Z}_1 + \overline{Z}_2 + \overline{Z}_0|} \quad (14)$$

missä c on taulukon 6 mukainen kerroin, U_n syöttävän verkon jännite, \overline{Z}_1 on myötäkomponenttiverkon impedanssi ja \overline{Z}_2 on vastakomponenttiverkon impedanssi ja \overline{Z}_0 on nollakomponenttiverkon impedanssi.

Käytännössä myötä- ja vastaimpedanssit ovat keskenään samansuuruiset vain johdoilla ja muuntajilla. Pyörivien koneiden, erityisesti tahtikoneiden vastaimpedanssit ovat selvästi pienemmät kuin koneen pysyvän tilan myötäimpedanssit. Nollaimpedanssit eroavat myötäimpedansseista käytännössä kaikkien kolmivaiheverkon komponenttien tapauksissa. Ehtona nollaimpedanssien huomioonottamiselle on, että nollavirralla on paluutie muuta kautta kuin vaihejohtimia pitkin.

Yleisesti käytetyn Dyn-kytkentäisen jakelumuuntajan oikosulkuvirrat toisiossa tapahtuvissa oikosulkutapauksissa näkyvät ensiöpuolella kuvan 8 mukaisesti. Muuntajan sulakemitoituksen kannalta merkittävin vika on yksivaiheinen alajännitepuolen maasulku, koska siinä laukaisun aiheuttama virta on pienin. Selektiivisyyden kannalta merkittävin vika on kaksivaiheinen oikosulku.



Kuva 8. Dyn-kytketyn muuntajan oikosulkuvirrat toisiossa kolmi- ja kaksivaiheisessa oikosulussa sekä yksivaiheisessa maasulussa; $IN1$ =ensiön nimellisvirta, $IN2$ =toisiossa nimellisvirta, uk =suhteellinen oikosulkuimpedanssi [%], uo =suhteellinen nolliimpedanssi, N =muuntajan muuntosuhde [10]

Oikosulkusuojauksen toteuttamisperiaatteet

Suojaustavan valinnalla voidaan vaikuttaa suojauksen toimintanopeuteen, jolla on merkittävä vaikutus oikosulun aiheuttamiin haittoihin. Mitä nopeammin suojaus toimii sitä pienemmiksi jäävät aiheutuvat vaaratekijät ja vahingot sekä verkon termiset rasitukset. Lisäksi oikosulusta aiheutuvan vian aikaisen jännitekuopan kesto jää sitä lyhyemmäksi mitä nopeammin suojaus toimii.

Selektiivinen oikosulkusuojaus voidaan toteuttaa seuraavilla tavoilla:

- aikaselektiivisellä suojauksella
- aika- ja virtaselektiivisellä suojauksella
- aika- ja suuntaselektiivisellä suojauksella
- virta- tai impedanssiselektiivisellä suojauksella
- lukitussuojauksella
- differentiaalisuojauksella
- distanssi- ja vertosuojauksella.

Aikaselektiivinen suojaus

Yksinkertaisin tapa toteuttaa selektiivinen suojaus on käyttää *aikaselektiivisyyttä*. Periaatteena on porrastaa suojauksen toiminta-aikoja siten, että aina lähimpänä vikakohtaa oleva rele ehtii toimia ensin.

Aikaselektiivinen suojaus toteutetaan ylivirtareleillä, jotka toimivat joko *vakioaikaisina*, jolloin toimintanopeus ei ole riippuvainen mitatun virran suuruudesta, tai *käänteisaikaisina*, jolloin toiminta on sitä nopeampaa mitä suurempi on mitattu virta. Aikaselektiivinen suojaus soveltuu parhaiten säteittäisverkkoihin.

Käänteisaikasuojaus soveltuu erityisen hyvin säteittäisverkkoihin, joissa kytkentätilanteiden muutosten aiheuttamat oikosulkuvirtatasojen vaihtelut ovat pienehköjä tai erot oikosulkuvirtatasoissa johtojen päiden välillä ovat suu-
rehkoja.

Käänteisaikasuojauksen käytöllä voidaan yleensä nopeuttaa suojauksen toimintaa suurilla vikavirroilla verrattuna vastaavan vakioaikasuojauksen käyttöön. Selektiivisen suojauksen toteuttaminen varokkeiden kanssa on myös helpompaa käyttämällä käänteisaikaista suojausta.

Aika- ja virtaselektiivinen suojaus

Aika- ja virtaselektiivistä ylivirtasuojauksista voidaan soveltaa tapauksissa, joissa vikavirran suuruus on erilainen riippuen siitä, onko vian sijainti suojan edessä vai takana.

Tällöin vikavirtatasojen erilaisuudesta johtuen voidaan erityisesti käänteisikäisen suojauksen, mutta myös moniportaisen vakioaikasuojauksen käytöllä saavuttaa erilaiset suojauksen toiminta-ajat erisuuntiin, ja näin toteuttaa tarvittava aikaselektiivisyys sekä täyttää asetetut toimintanopeusvaatimukset.

Aika- ja suuntaselektiivinen suojaus

Rengas- ja silmukkaverkkojen selektiivinen suojaus voidaan toteuttaa suunnattujen ylivirtasuojien avulla. Suunnattua suojausta tarvitaan, koska suojaukselta vaaditaan erilaisia toiminta-aikoja riippuen siitä, onko vikapaikka suojan edessä johdolla vai suojan takana esim. syöttävällä johdolla tai kiskotossa.

Suunnattu ylivirtasuojaus toimii, mikäli vikavirta ylittää virta-asettelun ja vikavirran suunta vastaa asettelua. Tällöin selektiivisyys perustuu sekä aikaan että vikavirran suuntaan.

Vikavirran suunnan määrittämiseen käytetään erilaisia periaatteita. Yksi perinteisesti käytetty tapa on tehdä suunnan määrittäminen vaihekohtaisesti siten, että kunkin viallisen vaiheen virran osoitinta verrataan kahden muun vaiheen välisen pääjännitteen osoittimeen. Tällöin rele laukaisee, jos yksikin vaihekohtaisista vertailuista osoittaa vian olevan releen toimintasuunnassa myötäsuuntaan tai asettelusta riippuen vastasuuntaan.

Virta- tai impedanssiselektiivinen suojaus

Rengas- ja silmukkaverkkojen suojaus voidaan toteuttaa myös suunnatuilla vakioaikaisilla ali-impedanssi- eli *distanssisuojilla*. Tätä suojaustapaa käytetään yleisesti siirtoverkkojen, silmukoitujen tai renkaana käytettyjen jakeluverkkojen sekä heikkojen säteittäisverkkojen suojaamiseen.

Tarkoituksena on asetella ylivirtaportaan virta-asettelu niin ylös, että vian tapahtuessa suojausketjussa seuraavana olevan suojan edessä, ei kyseinen porras havahdu, jolloin aikaselektiivisyyttäkään ei tarvita. Vastaavasti ali-impedanssiporrasta käytettäessä asettelu on laskettava riittävän alas, jotta saadaan aikaan vastaava toiminta.

Virta- tai impedanssiselektiivisellä suojauksella voidaan tietyissä tapauksissa oleellisesti nopeuttaa suojauksen toimintaa lähellä suojan sijaintipaikkaa tapahtuvissa vioissa.

Lukitussuojaus

Lukitussuojauksen tarkoituksena on nopeuttaa suojauksen toimintaa. Periaate soveltuu erityisesti kiskostojen suojaukseen, mutta sitä voidaan käyttää myös lyhyehköjen johtojen, muuntajan alajännitepuolen napojen sekä kojeiston syöttöhaaran suojaukseen. Peruseriaatteena on käyttää hyväksi suojasketjussa peräkkäisten suojienvälisiä lukituksia.

Parhaiten lukitussuoja soveltuu käytettäväksi säteittäisverkoissa, joissa oikosulkuvirrat ovat huomattavasti suurempia kuin kuormitusvirrat. Tällöin virta-asettelun löytäminen lukituksen antavalle ylivirtaportaalille on yleensä helppoa. [9, s. 228.]

Differentiaalisuojaus

Differentiaalisuojausta voidaan soveltaa kaikkien verkon osien eli muuntajien, koneiden, kiskostojen sekä johtojen suojaukseen. Differentiaalisuoja vertaa suojattavaan kohteeseen tulevia vaihevirtoja siitä lähteisiin. Jos nämä virrat poikkeavat toisistaan joko amplitudin tai vaihekulman tai näiden molempien suhteen enemmän kuin suojaan aseteltujen arvojen verran, seuraa laukaisu.

Mittausperiaatteen ansiosta suojaus toimii ainoastaan suojausalueella tapahtuvissa vioissa, jolloin suojaus on absoluuttisesti selektiivinen. Suojauksen toimintanopeus ja herkkyys ovat erittäin hyviä. Suojaus voi toimia alle puolijakson ja jopa muutaman prosentin nimellisvirrasta olevilla virroilla.

Distanssi- ja vertosuojaus

Distanssi- ja vertosuojauksen peruseriaatteet ovat samat kuin aika- ja suuntaselektiivisellä suojauksella.

Säteettäisen verkon oikosulkusuojaus

Säteettäisen jakeluverkon oikosulkusuojaus toteutetaan useimmiten vakioaikaylivirtareleillä. Peräkkäisten katkaisijoiden releiden hidastuksille on varattava riittävä aikaporrastus selektiivisyyden saavuttamiseksi. Samassa jännitetasossa tyydytään tavallisesti enintään kolmiportaiseen suojaukseen.

Ylivirtareleillä toteutetussa suojauksessa saattaa tulla ongelmia selektiivisyyden kanssa kytkentätilanteiden muuttuessa. Paikoissa joissa on suuret oikosulkuvirrat ei voida käyttää hidastettuja vakioaikaylivirtareleitä kaapeleiden ja johtojen termisten oikosulkukestoisuuksien vuoksi, silloin on käytettävä viiveetöntä pikalaukaisua tai käänteisaikaylivirtareleitä.

Silmukoidun verkon oikosulkusuojaus

Silmukoidussa jakeluverkossa oikosulkusuojaus toteutetaan distanssi- ja apuyhteysreleillä. Alueilla joilla sähköasemien välinen etäisyys on varsin lyhyt, käytetään ensisijaisina suojareleinä pitkittäisiä vertosuojia, joissa verrataan johdon eri päissä mitattuja virtoja keskenään.

Silmukoidun jakeluverkon runkojohtojen varasuojaukseen käytetään distanssireleitä. Niiden käyttö pääsuojina on mahdotonta impedanssimittausten epätarkkuuksista johtuen.

Johdoilla, joiden varsille liittyy kuormituksia, on käytettävä suuntavertosuojia. Suuntavertosuoja soveltuu myös maasulkujen suojaukseen. Oikosulkusuojissa mitataan vaihevirtoja ja vaihe- tai pääjännitteitä, maasulkusuojauksessa nollavirtoja ja -jännitteitä.

3.10.2 Maasulkusuojaus

Maasulkusuojaus on aikaisemmin perustunut maadoitusjännitteisiin. Maadoitusjännitteistä vain osa voi esiintyä kosketus- tai askeljännitteenä. SFS 6001-standardia laadittaessa on otettu lähtökohdaksi se tosiasia että sähköiskun vaarallisuus riippuu tunnetusti, paitsi kosketusjännitteestä, myös käyttöjännitteestä, sekä sähköiskuvirran kestoajasta. Mitä lyhyempi on virran kestoaika, sitä vähäisempi on virran aiheuttama hengenvaara.

Standardi perustuu todennäköisyyslaskennalliseen lähestymistapaan. Sallittu kosketus- ja askeljännite annetaan standardissa käyränä vian kestoajan funktiona, mikä vastaa 5 %:n sydänkammiovärinän syntymistodennäköisyyttä. Kosketus- ja askeljännitteelle voidaan siis sallia sitä suurempia arvoja riskitason pysyessä ennallaan, mitä lyhyemmän aikaa maasulkuvirta vaikuttaa.

SFS 6001-standardin kohdan 9.2.4 mukaan:

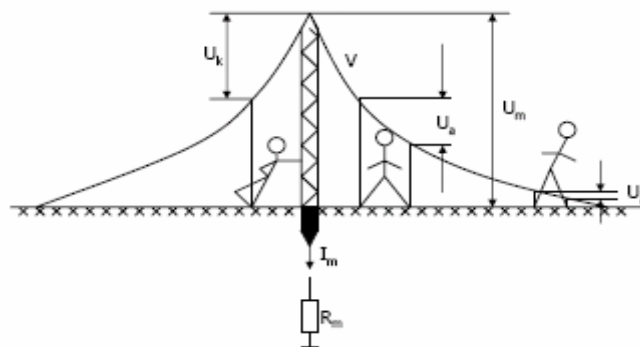
Jokainen maasulku kytetään pois automaattisesti tai käsin. Siten pitkäaikaista tai jatkuvaa kosketusjännitettä ei esiinny maasulkujen seurauksena.

Yleensä pitää käyttää maasulun automaattista poiskytkentää. Maasulusta aiheutuvaa hälytystä ja käsin tapahtuvaa poiskytkentää voidaan käyttää silloin, kun verkon käytön luonteen takia maasulun aiheuttama keskeytys on tarvetta siirtää sopivampaan ajankohtaan. Hälytystä ja käsin tapahtuvaa poiskytkentää käytettäessä on täytettävä seuraavat ehdot:

Verkon rakenteen tulee olla sellainen, että valokaarimaasulun todennäköisyys on pieni. Verkon on oltava joko kaapeliverkko tai ilmajohtoverkossa valokaarimaasulun on sammuttava itsestään.

Maasulusta on tultava hälytys, joka saatetaan verkon käyttöä valvovan henkilön tietoon. Vian selvittämiseen on ryhdyttävä välittömästi. Käyttöä maasulussa voidaan jatkaa yleensä enintään kahden tunnin ajan, ellei ole ilmeistä että maasulusta aiheutuu välitöntä vaaraa ihmisille tai omaisuudelle tai kohtuutonta häiriötä toiselle laitteistolle. Käyttöä maasulussa voidaan jatkaa pidempään vain, jos maasulun sijaintikohta on löydetty ja varmistetaan, ettei siitä aiheudu vaaraa. Jos maasulku sijaitsee jakelumuuntamolla, joka ei ole laajan maadoitusjärjestelmän alueella ei käyttöä saa jatkaa.

Jatkuvassa maasulussa esiintyvä maadoitusjännite saa olla korkeintaan pitkäaikaisesti sallitun maadoitusjännitteen suuruinen, kuitenkin korkeintaan 150 V. Televerkon asettamat vaatimukset on otettava huomioon. [12.]



Kuva 9. Maadoitus-, kosketus- ja askeljännite [13, s.414]

Maasulkuvirta I_m synnyttää maadoitusresistanssissa R_m jännitehäviön:

$$U_m = I_m \cdot R_m \quad (15)$$

Jännitettä U_m kutsutaan maadoitusjännitteeksi. Jos ihminen koskettaa maasulun aikana suojamaadoitettuja osia, vaikuttaa häneen kosketusjännite U_k , joka on korkeintaan jännitteen U_m suuruinen, käytännössä vain osa siitä.

Maasulkuvirta leviää maahan maadoituselektrodin ympäristössä, ja synnyttää maaperään potentiaal kentän. Tämän kentän vaikutuksesta kahden jaloilla kosketeltavan pisteen välillä maasulkupaikan läheisyydessä esiintyy askeljännite U_a .

Kosketus- ja askeljännite aiheuttavat maasulkukohdan läheisyydessä hengenvaaraa, mikäli ne ovat liian suuria. Niiden selvittäminen laskemalla on kuitenkin hyvin hankalaa. Sen sijaan maadoitusjännite on helposti laskettavissa.

Reduktiokerroin

On huomattava, että koko vikavirta I_F ei välttämättä kulje maadoituselektrodiin ja sitä kautta maahan. Osa virrasta voi kulkeutua rinnakkaistietä ukkosköysiä pitkin muihin maadoituksiin, tai naapurisähköaseman maadoituselektrodiin. Tämä seikka otetaan tarvittaessa reduktiokertoimen r avulla:

$$I_m = r \cdot I_F \quad (16)$$

Jakelumuuntamoilla ei yleensä ole ukkosköysiä, jolloin reduktiokerroin $r = 1$. 110 kV:n avojohdoilla $r = 0,85 \dots 0,95$, kun ukkosköydet ovat terästä ja luokkaa 0,2...0,55, kun ukkosköydet ovat teräs-alumiinia.

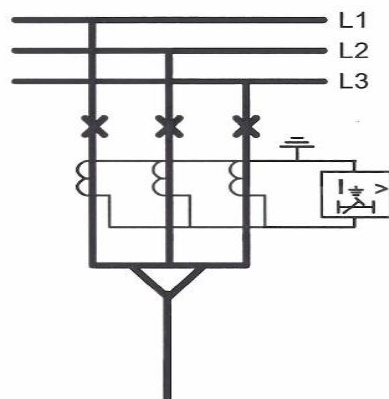
Maasulkuvirran mittaus

Maasulkuvirta mitataan vaihevirtamuuntajien summakytkennän, kaapelivirtamuuntajan tai vaihevirtasensorien ja laskennallisen summamittauksen avulla.

Summakytkentä

Summakytkentä muodostetaan kytkemällä eri vaiheiden virtamuuntajien toisiokäämit rinnan. Summakytkennän tarkkuuteen vaikuttaa ensisijaisesti virtamuuntajien samanlaisuus. Samasta valmistuserästä valitut virtamuuntajat ovat normaalisti niin samanlaisia, että summakytkennän tarkkuus voidaan olettaa samaksi kuin yksittäisten virtamuuntajien tarkkuusluokka.

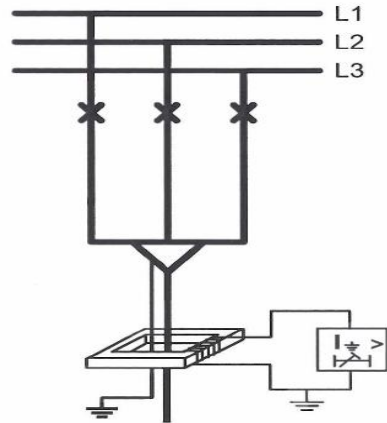
Summakytkennässä erotettavissa olevan maasulkuvirran suuruuteen vaikuttavat virtamuuntajien muuntosuhde sekä kuormitusvirran aiheuttama näennäinen nollavirta, jonka vaihekulma voi olla täysin mielivaltainen. Näennäinen nollavirta voi hetkellisesti kasvaa huomattavastikin, esim. kytkentävirtasysäysten aikana virtamuuntajien eriaikaisen kyllästymisen vuoksi, mikä suojausten suunnittelussa on otettava huomioon. Summakytkentä soveltuu tapauksiin, joissa maasulkuvirta on suuri tai kuormitusvirta pieni.



Kuva 10 Virtamuuntajien summakytkentä [10]

Kaapelivirtamuuntaja

Kaapelivirtamuuntajan avulla voidaan mitata hyvin pieniäkin maasulkuvirtoja ($< 0,5 \text{ A}$) riippumatta nimellisvirtojen suuruudesta. Tämän vuoksi kaapelivirtamuuntajaa on syytä käyttää aina, kun se on mahdollista. Kaapelivirtamuuntajan kuormitettavuus ei ole suuri, mutta pienen taakan omaavien numeristen suojarleiden yhteydessä tämä ei muodosta ongelmaa.



Kuva 11 Kaalivirtamuuntaja [10]

Virtasensorit

Vaihevirtasensoreita käytettäessä releen mittausalgoritmi laskee maasulkuvirran sensorien mittaamista vaihevirroista. Mittaustarkkuuteen vaikuttavat käytettyjen sensorien samanlaisuus sekä numeerisessa laskennassa syntyvät epätarkkuudet, jotka kuormitusvirtojen kulkiessa aiheuttavat näennäistä nollavirtaa.

Nollajännitteen mittaus

Verkossa syntyvä maasulku ilmenee aina nollajännitteenä, joka voidaan havaita kaikkialla verkossa. Maasulun yleishälytys on toteutettavissa maasulkujännitettä valvovan ylijännitereleen avulla.

Nollajännite voidaan mitata jännitemuuntajan avokolmiokäämityksestä tai verkon tähtipisteen ja maan välille kytketyn yksivaihemuuntajan toisiosta.

Nollajännite voidaan mitata myös jännitesensorien ja laskennallisen summamittauksen avulla. Releen mittausalgoritmi laskee nollajännitteen vaihekohtaisten sensorien mittaamista vaihejännitteistä. Etuna on lineaarisuus ja mittamuuntajien kippivärähtelyriskin poistuminen.

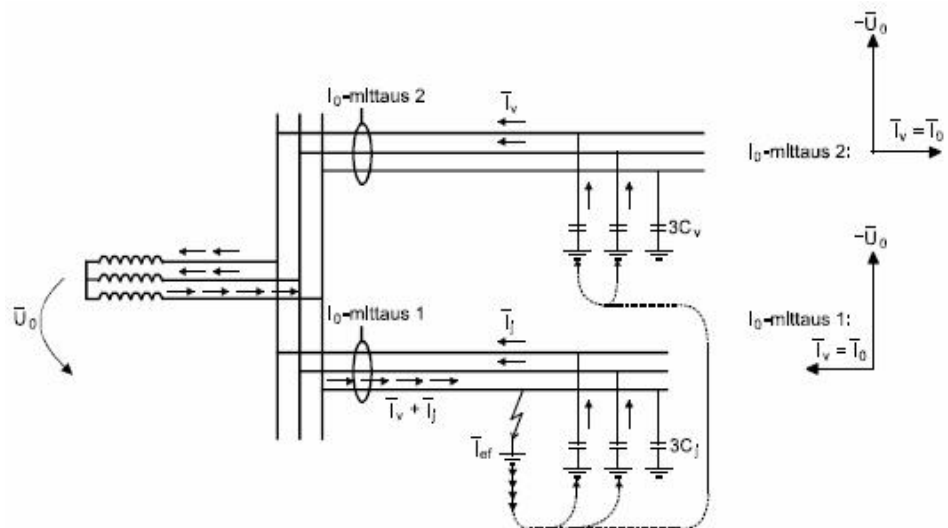
Maasulku maasta erotetussa verkossa

Maasta erotetussa verkossa ei ole johtavaa yhteyttä maapotentiaaliin lukuun ottamatta jännitemuuntajia. Terveessä tilassa vaihejohtimien maakapasitanssien kautta kulkevien virtojen summa on nolla.

Yksivaiheinen maasulku

Jos vaihejohdin tai kaapelin vaihe joutuu suoraan tai vikaimpedanssin kautta yhteyteen maapotentiaalin kanssa, pienenee viallisen vaiheen jännite ja varausvirta. Terveiden vaiheiden jännitteet maapotentiaalia vasten kasvavat kuten niiden varausvirratkin. Vaiheiden keskinäisiin jännitesuhteisiin (pääjännitteet) se ei vaikuta, eivätkä kuormitukset häiriinny.

Viallisen vaiheen maakapasitanssin kautta ei kulje varausvirtaa, koska sen jännite on nolla. Terveiden vaiheiden varausvirrat kiertävät generaattorien ja muuntajien käämien kautta vialliseen vaiheeseen ja sitä pitkin vikakohtasta maahan.



Kuva 12. Yksivaiheisen maasulkuvikavirran muodostuminen maasta erotetussa verkossa [9]

Maasulkuvirran I_{ef} ja nollajännitteen U_0 itseisarvot saadaan kaavoista 17 ja

18:

$$I_{ef} = \frac{\sqrt{3}\omega C_0}{\sqrt{1 + (3\omega C_0 R_f)^2}} \cdot U \quad (17)$$

$$U_0 = \frac{U / \sqrt{3}}{\sqrt{1 + (3\omega C_0 R_f)^2}} \quad (18)$$

missä C_0 on verkon yhden vaiheen maakapasitanssi ja R_f on vikaresistanssi.

Kaava 17 voidaan esittää muodossa, joka on hyödyllinen, kun tiedetään maasulkuvirta suorassa maasulussa.

$$I_{ef} = \frac{I_e}{\sqrt{1 + \left(\frac{\sqrt{3}I_e \cdot R_f}{U} \right)^2}} \quad (19)$$

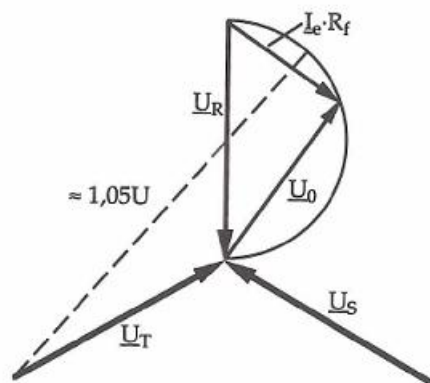
Kaavojen 17 ja 19 avulla saadaan nollajännitteen ja verkon vaihejännitteen suhteelle kaava 20:

$$\frac{U_0}{U_v} = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{\sqrt{3}I_e R_f}{U} \right)^2}} \quad (20)$$

Maasulkuvirran ja nollajännitteen välille saadaan yhtälöiden 17 ja 18 avulla kaava 21:

$$I_{ef} = -j\omega 3C_0 \underline{U}_0 \quad (21)$$

Nollajänniteosoitin piirtää kuvassa 13 vikaresistanssin funktiona puoliympyrän, jonka halkaisijana on viallisen vaiheen jännitteen osoitin. Silloin kun vikaresistanssi on nolla, on nollajännite vaihejännitteen suuruinen. Suurin terve vaiheen jännite maata vasten ($1,05 \cdot U$) saadaan silloin kun vikaresistanssi on noin 37 % maakapasitanssien summaa vastaavasta impedanssista.



Kuva 13 Jännitteiden osoittimet yksivaiheisessa maasulussa [8]

Verkon maasulkuvirran suuruus ei käytännössä riipu maasulun esiintymiskohdasta. Maasulussa olevan johdon syöttöpäässä releiden havaitsema virta ei sisällä johdon maakapasitanssien kautta kulkevaa osaa maasulkuvirrasta, eli taustaverkon syöttämäksi maasulkuvirraksi saadaan siten:

$$\sum I_v = \frac{C_0 - C_{0j}}{C_0} \cdot I_{ef} \quad (22)$$

missä C_{0j} on suojattavan verkon yhden vaiheen maakapasitanssi.

Kaapelin johtimien ja maan välinen maakapasitanssi on riippuvainen kaapelityypistä, erityysaineesta, lämpötilasta, sekä johtimen poikkipinnasta. Kaapeleiden käyttökapasitanssien ja maasulkuvirtojen keskimääräisiä arvoja on taulukoitu. Kun kaikille verkossa oleville johdoille on laskettu niiden itsensä tuottama maasulkuvirta suorassa maasulussa, saadaan taustaverkon syöttämä maasulkuvirta yhtälöstä:

$$\sum I_v = \frac{I_e - I_{ej}}{I_e} \cdot I_{ef} \quad (23)$$

missä I_e on verkon kokonaismaasulkuvirta suorassa maasulussa, I_{ej} on johdon syöttämä maasulkuvirta suorassa maasulussa, ja I_{ef} on vikaresistanssin vaikutuksesta pienentynyt maasulkuvirta.

Ilmajohdon maakapasitanssi on verrannollinen pääasiassa sen kokonaispituuteen. Johtimien ripustuskorkeudet, poikkipinta-alat, vaihevälit vaikuttavat kapasitanssiin suhteellisen vähän.

Avojohtoverkolle maasulkuvirta Ampeereina voidaan riittävän tarkasti laskea kaavasta 24:

$$I_0 = \frac{U \cdot l}{300} [A] \quad (24)$$

missä U on pääjännite kilovolteina ja l on galvaanisesti yhteen kytkettyjen kolmivaihejohtojen kokonaispituus kilometreinä.

Kaksoismaasulku

Kaksoismaasulussa kaksi vaihejohtinta joutuu joko suoraan, tai vikaresistanssien kautta galvaaniseen yhteyteen maan kanssa eri kohdissa verkkoa [8 s.306].

Kaksoismaasulussa viallisia johtoja on vikojen sijainnista riippuen joko yksi tai kaksi. Tilanteessa jossa molemmat viat sijaitsevat samalla johdolla voidaan taustaverkon syöttämä maasulkuvirta laskea yhtälöstä 22. Vikapaikkojen sijaitessa eri johdoilla on vikavirta laskettava Thevenin-mallin mukaisesti vähentämällä kokonaisvirrasta se osa maasulkuvirtaa, joka palaa tarkasteltavan johdon oman maakapasitanssin kautta.

Vikapaikkojen sijaitessa eri johdoilla on nollavirtareleiden havaitsema virta suurempi, koska releen havaitsemassa summavirrassa on mukana myös oikosulkuvirtakomponentti.

Samalla, tai eri johdoilla sattuvassa pieniresistanssisessa kaksoismaasulussa saattavat oikosulkusuojauksen ylivirtareleet toimia, vikapaikkojen välillä kiertävän vikavirran johdosta.

Maasulku kompensoidussa verkossa

Kompensoidussa verkossa verkon kapasitiivista maasulkuvirtaa kompensoidaan verkon tähtipisteeseen kytketyn kompensointikuristimen (Petersenkuristin) avulla. Induktiivinen reaktanssi pyritään asettelemaan verkon maakapasitanssien reaktanssin suuruiseksi. Kuristin on varustettava säädöllä sen sopeuttamiseksi verkon erilaisiin käyttötilanteisiin.

Kompensoinnilla saavutettavia etuja ovat:

- maasulkuvirta on hyvin pieni (n. 5 - 10 % maasta erotetusta)
- suurin osa maasuluista sammuu itsestään eli jälleenkytkennät vähenevät
- pienet kosketusjännitteet vikapaikassa
- sähkön laatu paranee.

Kompensoinnista aiheutuvia haittoja ovat:

- kuristimen lyhytaikainenkin poistaminen käytöstä muuttaa maasulkuvirran suuruutta ja vaihekulmaa, mikä on huomioitava releistyksen ja käytön suunnittelussa
- kompensointijärjestelmästä aiheutuvat hankintakustannukset
- virityksen epätarkkuuden on pysyttävä kohtuullisissa rajoissa, mikä tarkoittaa galvaanisesti yhteen kytketyn verkon pitämistä tietyissä rajoissa.

Kompensointi voidaan toteuttaa sekä keskitetysti että hajautetusti.

Keskitetty kompensointi

Keskijänniteverkoissa on vain harvoin muuntajan tähtipiste käytettävissä. Tämän vuoksi joudutaan muodostamaan keinotekoinen tähtipiste. Taloudellisimmin keskitetty kompensointi voidaan toteuttaa liittämällä kuristin 20 kV:n verkkoon Z-kytkentäisellä maadoitusmuuntajalla, jonka tähtipisteeseen kompensointikuristin liitetään. [9, s. 254.]

Hajautettu kompensointi

Hajautetussa kompensoinnissa riittävä määrä kompensointikuristimia sijoitetaan johtojen varsille. Johdon varrella sijaitseva kuristin mitoitetaan kyseisen johdon tuottaman kapasitiivisen maasulkuvirran mukaisesti. Tyypillisesti hajautetun kompensoinnin yhteydessä vain osa verkon maasulkuvirrasta kompensoidaan siten, että yksittäiset johdot eivät missään tilanteessa tule ylikompensoiduiksi.

Kompensointiaste

Kompensoinnin määrää kuvataan ns. kompensointiasteella K , joka saadaan kaavasta 25:

$$K = \frac{I_L}{I_C} \quad (25)$$

missä I_L on kuristimen virta suorassa maasulussa ja I_C on verkon kapasitiivinen maasulkuvirta suorassa maasulussa.

Verkko on ylikompensoitu $K:n$ ollessa suurempi kuin yksi, ja alikompensoitu $K:n$ ollessa pienempi kuin yksi.

Maasta erotetun säteittäisverkon selektiivinen suojaus

Selektiivinen laukaisu tai selektiivinen hälytys voidaan maasta erotetussa verkossa toteuttaa johtokohtaisten nollavirtareleiden tai nollajännitteeseen ja nollavirtaan kytkettyjen suuntareleiden avulla. Nollajännitettä mittaavan ylijännitereleen tehtävänä on tällöin toimia aseman suojana sekä lähtöjen suo-
jien varasuojina.

Suuntaamaton suojaus

Suuntaamattoman eli nollavirtareleisiin perustuvan suojan toiminta perustuu terveiden lähtöjen maakapasitanssien kautta palaavan maasulkuvirran mit-
taamiseen. Maasulkuvirta voidaan laskea yhtälöistä 22 tai 23. Koska toimin-
ta perustuu ainoastaan virran suuruuteen, on suojattavan lähdön syöttämän
maasulkuvirran oltava riittävästi pienempi kuin muun verkon syöttämä maa-
sulkuvirta.

Nollavirtareleisiin perustuvan suojauksen selektiivisyys on riippuvainen kyt-
kentätilanteesta ja vikaresistanssin suuruudesta. Tämän vuoksi se soveltuu
lähinnä kaapeliverkkoihin, joissa suuriresistanssisten vikojen syntyminen on
epätodennäköistä.

Optimaalista suojauksen kannalta on, että suojattava verkko muodostuu
useista, likipitään samanpituisista lähdöistä. Jos jonkin johdon pituus tulee
suuremmaksi tai yhtä suureksi kuin muu osa verkkoa, kyseisen johdon nol-
lavirtareleillä ei voi saavuttaa lainkaan selektiivisyyttä edes vikaresistanssin
ollessa nolla.

Suuntaamattoman suojauksen herkkyyttä voidaan parantaa varmistamalla
nollavirtareleen toiminta nollajännitereleeltä tulevalla lukituksella, joka pois-
tuu nollajännitereleen havahtuessa.

Suunnattu suojaus

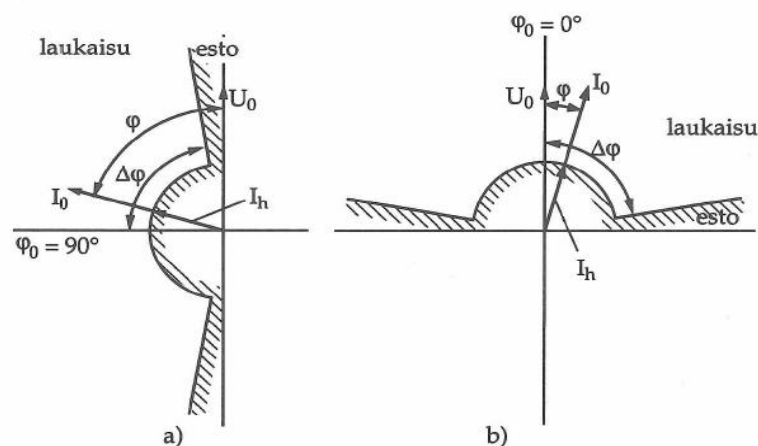
Jos nollavirtareleillä ei voida saavuttaa selektiivisyyttä, on käytettävä suunta-
releitä, joiden toiminta maasta erotetuissa verkoissa perustuu nollavirran ja
nollajännitteen muodostaman nollaloistehon suuntaan. Nollaloistehon suunta
riippuu siitä, kummalla puolella virtamuuntajia maasulku tapahtuu. [8, s.
330.]

Suuntareleillä toteutetun maasulkusuojauksen selektiivisyys ei siis perustu nollavirtojen suuruuksiin, vaan niiden suuntiin. Nykyiset releet mittaavatkin vaihekulmaa eivätkä tehoa. Suojaus toimii, kun nollavirran ja -jännitteen suuruudet ylittävät asetteluarvot ja nollavirran vaihekulma nollajännitteeseen nähden on asetellulla toimintasektorilla.

Suuntareleiden etuna on niiden asettelujen riippumattomuus johtopituuksista varsin laajalla alueella. Suunnatun suojauksen käyttö on optimaalista silloin, kun kytkentätilanne vaihtelee suuresti ja halutaan suojauksen toimivan myös suurilla vikaresistanssin arvoilla.

Suunnattua suojausta voidaan täydentää pelkästään nollavirran suuruuteen perustuvalla suuntaamattomalla suojauksella. Kaksoismaasulkutilanteissa suuntaamattomalla suojalla nopeutetaan ja varmistetaan suojauksen toiminta varsinkin silloin, kun vikavirran suuruus jää vikaresistanssin vaikutuksesta pienemmäksi kuin ylivirtasuojien virta-asettelut. Lisäksi sopivalla asettelulla suuntaamaton suoja saadaan toimimaan ainoastaan kaksoismaasulkutilanteissa, jolloin saadaan selvä indikaatio vikatyypistä. [9, s. 261.]

Kompensoidussa verkossa ei selektiivistä suojausta voi toteuttaa nollavirtareleillä eikä loistehoon tai -virtaan perustuvilla suuntareleillä, sillä kuristimen kautta maahan kulkeva loisvirta sekoittaa tällaisen suojauksen toiminnan. Johtojen nollavirtojen pätökomponentit sen sijaan noudattavat samoja suuntalakeja kuin nollavirtojen loiskomponentit maasta erotetussa verkossa.



Kuva 14. a) Vaihekulmasuuntareleen osoitindigrammi loisvirtakytkennässä (maasta erotettu verkko) b) Vaihekulmasuuntareleen osoitindigrammi pätövirtakytkennässä (kompensoitu verkko) [8, s.333]

3.11 Sulakesuojaus

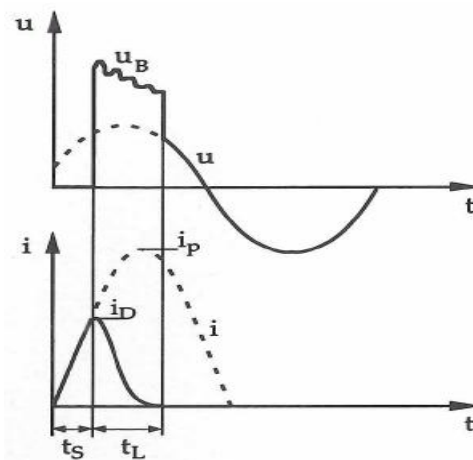
Sulake muodostaa osan ns. varokkeesta, jonka muita osia ovat sulakkeen lisäksi varokepohja tai -pesä sekä tulppasulakkeilla myös varokekansi ja pohjakosketin.

Katkaisijan ja ohjaavan releen käyttö ei tule taloudellisista syistä aina kysymykseen ja silloin käytetään johtojen, sähkölaitteiden, pienehköjen muuntajien oikosulku- ja ylikuormitussuojina varokkeita. Kahvavarokkeita käytetään pienjänniteverkon suojaukseen niiden edullisuuden, turvallisuuden, selektiivisyyden ja hyvän virranrajoitus- ja katkaisukyvyyn vuoksi.

Sulakkeiden ominaisuudet

Sulakkeiden ominaisuuksia kuvataan sulamis- ja virranrajoituskäyrästä. Sulamiskäyrästä ilmoittaa symmetrisen oikosulkuvirran tehollisarvon ja sulamisajan välisen riippuvuuden. Sulake ei toimi nimellisvirrallaan vaikka virta vaikuttaisi äärettömän kauan. IEC 60269-1-standardi määrittää nimellisvirtojen mukaiset kestopaja- ja sulamisrajavirrat, ja ajat joiden puitteissa sulakkeiden on toimittava.

Virranrajoituskäyrästä kuvaa sulakkeen oikosulkuvirran rajoituskyvyn. Sulakkeilla oleva erinomainen virranrajoituskyky perustuu sulakkeen sisällä syntyvään valokaariresistanssin nopeaan kasvuun. Virranrajoituskäyrästä voidaan lukea suurin virtahuippu, jonka sulake päästää läpi tietyllä prospektiivisen virran arvolla.



Kuva 15. Sulakkeen oikosulkuvirran rajoituskyky, missä i_p on rajoittamaton sy-
säysoikosulkuvirta, i_D läpäisyvirta, t_s sulamisaika ja t_L on valokaariaika [8, s. 383]

Tärkeä ominaisarvo nimellisvirran ja -jännitteen lisäksi on katkaisukyky. Sulakkeen nimelliskatkaisukyky on suurin virta, jonka sulake pystyy katkaisemaan. Nimelliskatkaisukyky ilmoitetaan virta-arvona, ja se määritetään oikosulkuvirralla tyypillisen hyvin induktiivisen virtapiirin avulla ($\cos\varphi < 0,15$ ind).

4 HELSINGIN ENERGIAN SÄHKÖVERKKO

4.1 Tuotantolaitokset

Helsingin Energialla on neljä yhteistuotantovoimalaitosta. Hanasaaren ja Salmisaaren voimalaitokset käyttävät polttoaineenaan kivihiiltä ja Vuosaaren A- ja B-voimalaitokset maakaasua. Lisäksi Helsingin Energialla on ainoana pelkästään sähköä tuottavana laitoksena Kellosaaren kaasuturbiinilaitos, joka toimii varavoimalana ja jonka tehon on vuokrannut Fingrid Oyj.

Ainoastaan kaukolämpöä tuottavina elementteinä on lämpökeskuksia sekä Salmisaari A-voimalaitos. Kaukokylmää tuotetaan Salmisaareissa kahdella absorptiojäähdytyskoneella ja Sörnäisissä lämpöpumppulaitoksella.

4.2 Siirto- ja jakeluverkko

Helsingin siirtoverkon jännite on 110 kV, ja verkko on yhteydessä Vantaan 110 kV:n verkkoon Vaaralan ja Tammiston sähköasemien kautta. Helenin verkko on myös yhteydessä Suomen kantaverkkoon Tammiston 400 kV:n ja Länsisalmen 400 kV:n asemien kautta. Espoon Leppävaaraan on 110 kV:n yhteys Kannelmäestä ja Porvooseen sekä Ruotsinkylään on yhteys Vaaralan sähköaseman kautta. Sähköasemia Helsingin Energialla on 21 kpl (11 kpl 110/20 kV ja 10 kpl 110/10 kV) ja voimalaitoksia 5.

Pääsuojina 110 kV:n avojohdoilla Helsingissä ovat differentiaalireleet tai vertosuojat. Toisena pääsuojana käytetään distanssireleitä. Kaapeliyhteyksien ja päämuuntajien pääsuojina ovat differentiaalireleet. Kaikilla sähköasemilla on 110 kV:n kiskosuoja.

Helsingissä keskijänniteverkko on maasta eristetty ja 110 kV:n verkko osittain maadoitettu. Tämä tarkoittaa, että osa muuntajien yläjännitepuolen tähtipisteistä on varustettu kuristimella. Helsingissä kolmella sähköasemalla on maadoituskuristimet.

Tulevaisuudessa Helenin keskijänniteverkko saattaa olla sammutettu eli kompensoitu. Seuraavaksi rakennettavalle Pukinmäen sähköasemalle on määrä toteuttaa ensimmäinen sammutettu järjestelmä. Tulevaisuudessa on aikomus rakentaa sammutetuksi koko Helsingin keskijänniteverkko.

4.3 Vuosaaren voimalaitokset

Sataman välittömässä läheisyydessä sijaitsevat Vuosaaren A- ja B-voimalaitokset ovat tyypiltään niin sanottuja kombivoimalaitoksia, joissa energiaa tuottavat kaasu- ja höyryturbiiniprosessit on yhdistetty. Kombiteknikan ansiosta voimalaitosten hyötysuhde on erittäin korkea, yli 90 %, eli maakaasun energia pystytään hyödyntämään tuotannossa lähes kokonaan. Voimalaitosten sähkön tuotantoteho on 630 MW ja kaukolämmön tuotantoteho 580 MW.

4.4 Vuosaaren sähköasema

Vuosaaren voimalaitoksilta lähtevä sähköteho johdetaan voimalaitoksien välittömässä läheisyydessä sijaitsevan vuosaaren sähköaseman kautta siirtoverkkoon. Sähköaseman päämuuntajien koko on 40 MVA. Sähköaseman nykyinen kuormitustaso on noin 31 MVA.

Satama-alueen sähkönsyöttöä varten on asemalta varattu kolme 20 kV lähtöä. Syötöt kaapeloidaan AHXAMK-W 3 * 240+70 Cu sekä mahdollisesti osittain AHXAMK-W 3 * 300+70 Cu-tyyppisellä maakaapelilla.

Tehonsyöttö satamaan

Vuosaaren alueen eläessä voimakasta kasvun aikaa ja Vuosaaren sähköaseman tehonsyöttökapasiteetin reservin ollessa pieni, saattaa lähitulevaisuudessa Vuosaaren sähköasemalle olla tulossa suuria tehonsyöttökapasiteetin kasvattamiseen liittyviä investointeja.

Sataman kahden ostopisteen sijainti ja syöttävän verkon topologia ilmenee alueen keskijänniteverkon yleissuunnitelmasta (liite 2). Perusajatuksena tehonjaolle on, että tehonsyöttökapasiteetiltaan suurempi ostopiste 1 syöttää tehosta n. 2/3 ja ostopiste 2 vastaavasti n. 1/3.

Lisäksi VL12 muuntamalla on varauduttu kolmannen syöttöpisteen mahdollisuuteen, joka voi toteutua, jos laivojen maasähkösyötöt toteutetaan. Tällöin satama on mahdollisesti pakko liittää Helenin 110 kV:n verkkoon.

5 VUOSAAREN SATAMAN SÄHKÖVERKKO

Vuosaaren satama-alueen sähkönjakeluverkko muodostuu pääosin kahdesta rengasmaisesta 20 kV:n kaapeliverkosta, seitsemästä muuntamosta keskijännitekojeistoinen, ja niissä sijaitsevista 14 jakelumuuntajasta.

Muuntamoilta syötetään 20 kV:n jakeluna 6 kappaletta ns. reefer- eli kylmäkonttimuuntajia sekä 12 kappaletta nostureita.

Muuntamoiden pienjännitepääkeskuksilta syötetään 400 V:n jakeluna lähi-alueen kuormituksia ja mm. valaistusta.

Suurimmat yksittäiset kuluttajat ovat nosturit. Reefer-konttikentät, valaistus, (ja mahdolliset laivojen maasähkösyötöt) ovat alueen seuraaviksi suurimmat kulutukset. Muita kulutuspisteitä ovat alueelle tulevat rakennukset ja erilaiset lämmitykset.

5.1 Sataman 20 kV:n järjestelmä

5.1.1 20 kV:n jakeluverkon topologia

Verkon topologian suhteen suoritettiin tarkasteluja, ja välivaiheiden kautta päädyttiin ratkaisuun, jonka peruskäyttötilanne ilmenee Vuosaaren sataman 20 kV:n yleiskaaviosta (liite 3).

Ensimmäisissä sataman 20 kV:n jakeluverkon suunnitelmissa muuntamo VL18 syötettiin vain muuntamolta VL17 (liitteet 1 ja 3). Tämä tarkoitti suojauksen porrastamisen näkökulmasta sitä, että katkaisijoita olisi jopa neljä sarjassa. Lisäksi verkon käytön joustavuus vikatilanteissa oli VL18 kohdalla minimaalinen. Sataman on kuitenkin tarjottava kaikille operaattoreille tasapuolinen sähkönlaatu ja syöttövarmuus, joten verkon topologiaa päätettiin tarkastella uudelleen.

Peruskäyttötilanteen topologiaan päädyttiin edellä mainituista tehojaollisista syistä, jotka määräytyivät alueen keskijännitteen syöttökapasiteeteista sataman ostopisteissä. Poikkeustilanteissa voidaan muuntamalla VL9 yhdistää verkon renkaat ja syöttää tehoa renkaasta toiseen.

5.1.2 Tehonjako satamassa

Arvioitu tehonjako sataman verkossa tässä vaiheessa käytössä olevilla lähtötiedoilla ilmenee liitteestä 3. Tehonjaon arvioinnista haasteellisen tekee suurimpia kuormituksia satamassa edustavat (n. 2 000 kW/kpl) keskijännitteellä syötettävät nosturikuormitukset ja niiden käyttö.

Nostureiden normaalissa nostotyössään ottamien todellisten kuormitusvirtojen sekä nostureiden välisten käyttökertoimien arviointi on hankalaa tuntematta tavaravolyymeja sekä satamatyön luonnetta. Hollantilaiseen Kalmar-nosturitoimittajaan oltiin sähköpostitse yhteydessä tavoitellen juuri em. tietoja. Vastaukseksi saatiin vain heidän sopimusehdoissaan mainittuja maksimikuormitustietoja.

Finnsteveltä saatiin kuitenkin tietoa sataman nostureiden perusnostotöistä, joiden keskipainoiksi arvioitiin noin 40 tonnia. Nostureiden maksiminostokyvyksi Kalmarin toimittamista nosturimanuaaleista saatiin 100 tonnia, josta voitiin karkeasti päätellä nosturin peruskäytön olevan noin 40 - 50 % maksimista.

Kalmarilta Finnsteven hankkimat nosturikäytöt ovat neli-kvadranttikäyttöisiä taajuusmuuttajaohjattuja epätahtikoneita, joissa on GTO-katkojat ylimääräisen tehon takaisinsyöttöä varten. Ylimääräinen teho voidaan syöttää takaisin joko nosturin omaan järjestelmään, tai syöttävään verkkoon.

Nostureiden syöttöverkosta ottaman tehon oletettiin korreloivan jokseenkin lineaarisesti nostettavan massan kanssa, joten nostureiden kuormituskerroimeksi arvioitiin 0,5.

Sataman eri laiturialueilla tapahtuvan nostureiden lastinkäsittelyn yhteiseksi käyttökertoimeksi arvioitiin 0,5. Näistä saatiin peruskäyttökerroin $0,5 * 0,5 = 0,25$, jonka avulla laskettiin nostureiden osalta tehonjako liitteeseen 3. Suurjännitteisten reefer-kuormien käyttökertoimeksi valittiin 0,6. Pienjännitekuormien yhteisenä käyttökertoimena käytettiin 0,6.

5.1.3 Kojeistot

Keskijännitekojeistot ovat rakenteeltaan kennokoteloituja, kiskostoiltaan ilmaeristeisiä ABB Uniswitch-mallisia nimellisarvoiltaan: U_n 24 kV, I_n 630 A, I_{1s} 16 kA, I_{dyn} 40 kA, $I_{vk(1s)}$ 20 kA. Kiskomateriaalina on käytetty kuparia ja kotelointiluokka on IP2XC.

Kojeistojen osalta tarjouskilpailun voitti YIT Oy joka toimittaa ja asennuttaa kojeistot paikoilleen.

20 kV:n kojeistoista syötetään suoraan satamanostureita joita tulee alueelle n. 12 kpl. Osa nostureista siirretään Vuosaaren muista Helsingin satamista. Muutamalle muuntamolle on lisäksi varattu lisäkennoja mahdollisia laivojen maasähkösyöttöjä varten.

Kojeistoihin asennetaan myös pienet UPS-järjestelmät (*Uninterruptible Power System*), koska kaikki apujännitteet sekä viritysmoottoreiden jännitteet ovat 230 VAC.

5.1.4 Mittamuuntajat

Virtamuuntajat pitkittäiskatkaisijakennoissa ja muuntajalähtökennoissa ovat tyyppiä TPU 60.13; S1; $I_s = 5A$; 5 VA; 5P10. Ostopisteiden mittauskennoihin mittamuuntajat toimittaa Mitox Oy. Heleniltä on saatu poikkeuslupa käyttää energiamittausjännitemuuntajien avokolmiokäämistä nollajännitteen ilmaisuun, sekä ottaa em. mittamuuntajilta myös vaihejännitetiedot.

Ostopisteiden muuntamoissa olevien johtolähtökennojen (sekä oletettavasti myös alamuuntamoiden) virtamuuntajat ovat tyyppiä TPU 60.13; S1; $I_s = 5 A$; 5 VA; I_k 0,2S; FS10 ja S2; $I_s = 5 A$; 5 VA; 5P10 ja kaapelivirtamuuntajat ovat tyyppiä KOLMA 06D1; 2 VA; I_k 10P10.

Liitteestä 5 havaitaan että virtamuuntajien suojaus- ja mittauskäämit joutuvat paikoitellen oikosulkutilanteissa toistamaan reilusti suurempia virtoja kuin mitä mittarivarmuuskerroin ja tarkkuusrajakerroin sallivat.

Mittauskäämin eräs tehtävä on suojella sen perässä olevia mittalaitteita. Ylivirta-alueilla toisiovirran käyrämuoto vääristyy, ja toisiovirrat saattavat nousta vaarallisen suuriksi mittareille. Sähköenergian mittauksissa standardin SFS 3381 mukaan virtamuuntajien mittarivarmuuskerroin tulee olla ≤ 10 .

Energiamittausjännitemuuntajien tarkkuusluokan tulee olla 0,2S, eikä nimellistaakka saa muodostua liian suureksi. Vuosaareen tilatuissa mittamuuntajissa taakan on vaadittu olevan ≤ 10 VA.

Tarkkuusrajakertoimet (kuten myös mittarivarmuuskertoimet) ilmoitetaan mitoitustaakalla (esim. 5 VA). Todellisen taakan tästä poiketessa voidaan todellista taakkaa vastaava tarkkuusrajakerroin laskea kaavasta 26:

$$F_a = F_{an} \frac{\overline{S_j + S_n}}{\overline{S_j + S_k}} \quad (26)$$

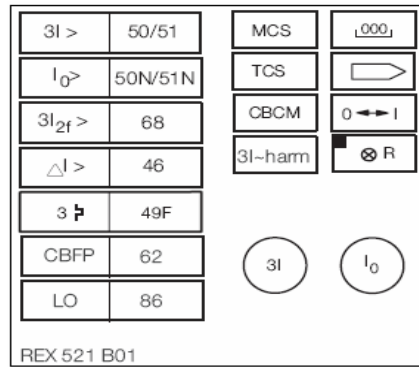
missä $\overline{F_{an}}$ on nimellistaakkaa vastaava mittarivarmuus- tai tarkkuusrajakerroin, $\overline{S_j}$ on sisätaakka, $\overline{S_n}$ nimellistaakka sekä $\overline{S_k}$ on todellinen taakka.

Kun oletetaan sisätaakka nollassi, ja keskimääräiseksi virtamuuntajien ym. toimilaitteiden taakaksi 2,5 VA, niin saadaan todellista taakkaa vastaavaksi tarkkuusrajakerroimeksi 20. Liitteestä 5 huomataan tämän arvon riittävän kaikissa tapauksissa.

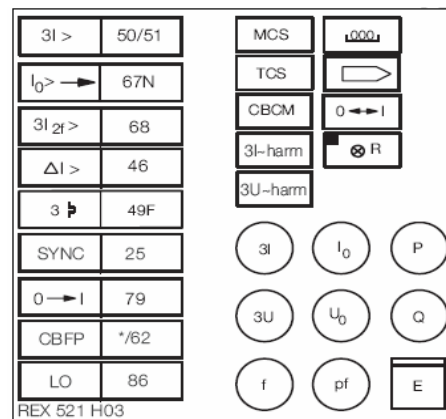
5.1.5 Suojareleet

Suojauksesta, ohjauksesta, mittauksesta ja valvonnasta 20 kV:n kojeistoissa huolehtivat ABB REX 521-tyyppiset suojareleet, jotka mahdollistavat katkaisijan ohjauksen väylän kautta. Releisiin liitetään SPA ZC-402-väyläsovittimet, joiden välillä tieto viedään kuidulla. Lisäksi asennetaan kojeistokohtaisesti yhteen kennoista ohjainyksikkö SPOC 112C-AA.

Johtolähtö- ja syöttökennoihin valittiin vakiokonfiguraatio H03 muuntajakennoihin vakiokonfiguraatio B01. Releiden IEEE-numerot ja niiden toteuttamat funktiot on esitetty kuvissa 16 ja 17.

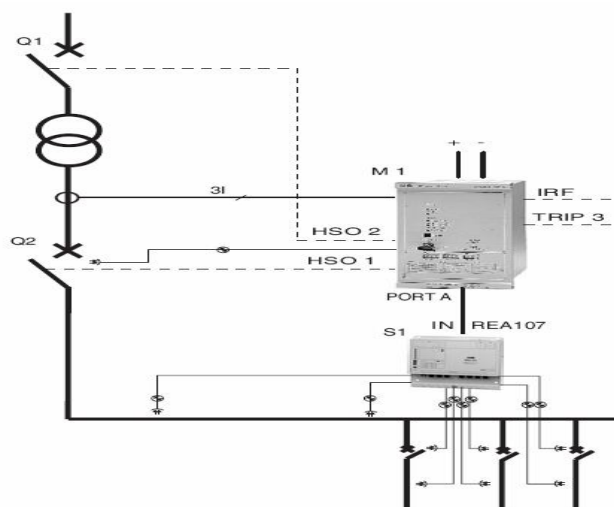


Kuva 16. REX-541 B01releen toimilohkot ja IEEE-numerot [14]



Kuva 17. REX-541H03 releen toimilohkot ja IEEE-numerot [14]

Kiskostojen valokaarisuojaukseen käytetään REA 101-AAA tyypistä valo-kaarirelettä varustettuna REA 107 laajennusyksiköin, sekä linsseillä varustetu-
tuin sensorikaapelein. Toimiessaan valokaarirele laukaisee syöttökentän kis-
kokatkaisijan.



Kuva 18. Esimerkki valokaarisuojauksen toteutusperiaatteesta [15]

Katkaisijat

Katkaisijat ovat kiinteitä SF₆ mallisia (ABB; HD4/S; 24 kV; 630 A; 16 kA_{1s}). Katkaisijassa käytetään SF₆-kaasua valokaaren sammuttamiseen ja eristykseen. Katkaisijan pääkoskettimet on asennettu erillisille pilareille.

5.1.6 Kuormanerottimet

Kuormanerottimet ovat suljettuja, huoltovapaita, kolmiasentoisia SF₆-eristeisiä (ABB; SDC; 24 kV; 630 A; 16 kA_{1s}).

5.1.7 Kaapelit

20 kV runkoverkon kaapeleina käytetään kiinteään ulkoasennukseen hyvin soveltuvaa AHXAMK-W 3 * 240+70 Cu ja mahdollisesti osittain AHXAMK-W 3 * 300 + (70) Cu-tyyppistä maakaapelia.

Nostureiden syötöt ja reefer-konttimuuntamot kaapeloidaan todennäköisimmin AHXAMK-W- ja tai AHXAMK-WTC-tyyppisillä keskijännitekaapeleilla.

5.2 Muuntajat

20/0,4 kV:n muuntajia satama-alueelle tulee 20 kappaletta. Jakelumuuntajia alueelle tulee 14 kappaletta (12 kpl 1,6 MVA ja 2 kpl joko 1 MVA tai 1,25 MVA) ja reefer-muuntajia 6 kappaletta. Muuntajat ovat Elin-merkkisiä, hermeettisiä ja öljyeristeisiä.

5.3 Sataman 400 V:n järjestelmä

5.3.1 Kiskosillat

Jakelumuuntajien ja 400 V:n keskusten välillä energia siirretään kiskosilloja pitkin. Kiskosiltojen nimellisarvot ovat $I_n = 2500$ A, $I_{1s} = 40$ kA, $I_{dyn} = 100$ kA. Jäljempänä mainitun TVOC-valokaarisuojausjärjestelmän anturit ulotetaan valvomaan myös kiskosilloja.

5.3.2 Keskukset

Muuntamorakennuksiin asennetaan eri jakelualueita palvelevat sähköpääkeskukset U_n 400 V, I_n 2500 A, I_{k1s} 40 kA, I_{dyn} 100 kA (yhteensä 14 kpl), joiden kautta energia siirretään satama-alueelle pienjännitejakeluna. Tarjouskilpailun pienjännitekeskuksista voitti Jonator Oy.

Keskukset varustetaan ABB TVOC-valokaarisuojalaittein, jotka koostuvat valokaarivartijoista antureineen ja virranmittausyksiköistä.

5.3.3 *Katkaisijat*

Pienjännitekeskukset suojataan ABB Sace E3N25WMP3 ulosvedettävillä ilmakatkaisijoilla ja PR121/P LSI-tyyppin suoja-releillä. Suojareleissä on vakio-kulmakertoimella varustettu käänteisaikainen ylikuormitussuojaus, oikosul-kusuojaus säädettävällä viiveellä, sekä oikosulun pikalaukaisutoiminto.

5.3.4 *Kaapelointi*

400 V:n jakeluverkon runkokaapeleina käytetään pääosin AXMK-tyypeistä kaapelia. Tärkeät kuormitukset, kuten valaistus tullaan kaapeloimaan ren-gasmaisesti joko yhdeltä, tai kahdelta muuntamolta, käytön ollessa kuitenkin säteittäinen.

Sataman pienjännitejakelussa on kohtuullisen suuria tehoja siirrettävä jois-sain tapauksissa yli 500 m:n päähän, tällöin jännitteenalenema muodostuu määrääväksi mitoittavaksi tekijäksi kaapelikokoja valittaessa.

5.4 **Maadoitusjärjestelmä**

Sataman mittavissa maanrakennustöissä osa hienorakenteisista maa-aineksista korvataan moreenilla ja merihiekalla. Täytemaiden resistiivisyys on maadoitusten kannalta huono eli 1 000 - 3 000 Ω m, moreenilla jopa

10 000 Ω m. Jotta luotettava ja toimiva maadoitusjärjestelmä voidaan raken-taa, maaperän ominaisresistanssin on oltava alle 100 Ω m.

Laaja maadoitusjärjestelmä

SFS 6001-standardi tulkitsee, että kosketusjännite pysyy automaattisesti turvallisen pienenä, jos sähköasennus on osa laajaa maadoitusjärjestelmää. Tällainen tilanne on usein suurten teollisuuslaitosten tonteilla, joissa maadoi-tuselektrodi on koko tonttialueen kattava silmukoitu, lukuisista maadoitus-köysistä, maanalaisista putkistoista yms. muodostuva. Tällaisessa tapauk-sessa vaarallisten kosketus- ja askeljännitteiden muodostuminen on epäto-dennäköistä.

Sataman maadoitusjärjestelmä on osa Helsingin Energian laajaa maadoitusverkkoa. 20 kV:n syöttökaapeleiden maadoitusköydet muodostavat yhteyden verkkoyhtiön maadoitusverkkoon. Sataman paikallisilla standardin SFS 6001 mukaisilla maadoituksilla täydennetään maadoitusjärjestelmää. Alueella on 50 mm² ja 25 mm² Cu verkot, joita täydennetään mereen upotettavilla maadoituselektrodeilla.

5.5 Oikosulkusuojaus

5.5.1 Laskennan lähtökohdat

Lähtökohdaksi sataman oikosulkuvirtojen ja niiden vaihtelutasojen selvittämiseksi saatiin verkonhallintaohjelma Harrisin laskelmista oikosulkutehojen vaihtelualueeksi Vuosaaren sähköasemalla 110 kV tasolla n. 400 - 6 000 MVA riippuen kytkentätilanteesta.

Sähköpäävalvomon henkilökunnan haastattelun ja Harris-ohjelman laskujen perusteella oikosulkuvirtatasot Helsingin eri sähköasemilla 110 kV:n tasolla ovat nykyisin maksimissaan n. 30 kA. Verkon topologia on aikaisemmin ollut sellainen, että jossain sen osissa on saattanut esiintyä jopa 40 kA:n vikavirtoja.

Suojauksista vastaavalta insinööriltä saamani tiedon mukaan verkkoa on kyllä jaettu osiin oikosulkuvirtojen pienentämiseksi, mutta osiin jakaminen ei välttämättä ole pysyvä ratkaisu. Pienin oikosulkuteho (400 MVA)saattaa tulla kysymykseen tilanteessa, jossa Helsinki ja Vantaa jäävät 110 kV:n tasolla saarikäyttöön, eli irti kantaverkosta.

Taustaverkon impedansseilla on marginaalinen rooli loppupään oikosulkuvirtaa laskettaessa, joten laskennat maksimi- ja minimioikosulkuvirtojen osalta päätettiin laskea Excel-sovelluksella käyttäen 400 - 8 000 MVA oikosulkutehoja.

5.5.2 Excel-sovellus

Laskennassa käytettiin Helen Sähköverkko Oy:n suojaus- ja sähkönlaatuinsinööriltä saatua laajahkoa Excel-ympäristöön tehtyä sovellusta, jota käytetään pääasiassa keskijänniteverkon suojauslaskentaan Helsingin energian verkossa. Ohjelma suorittaa laskennat IEC-909-standardin mukaisesti.

Laskentaohjelmassa on mahdollista ottaa huomioon paitsi Helenin omat generaattorit, myös Helenin verkkoon liittyvät suurjänniteasiakkaiden generaattorit. Laskelmat suoritettiin passiivisella taustaverkolla Vuosaaren voimalaitosten läheisyydestä huolimatta.

Suurinta 3-vaiheista oikosulkuvirtaa I_{k3} laskettaessa laskenta-arvoina olivat:

- taustaverkon oikosulkuteho 8 000 MVA
- laskentajännite 20 kV
- IEC-60909 jännitekerroin c 1,1
- johtimen käytönaikainen lämpötila 20 °C
- kaapelin johtimen resistanssi $R_{j,min} = R_{j, 20 \text{ ast.}}$
- käämikytkin keskiasennossa.

Pienintä 2-vaiheista oikosulkuvirtaa I_{k2} laskettaessa laskenta-arvoina olivat:

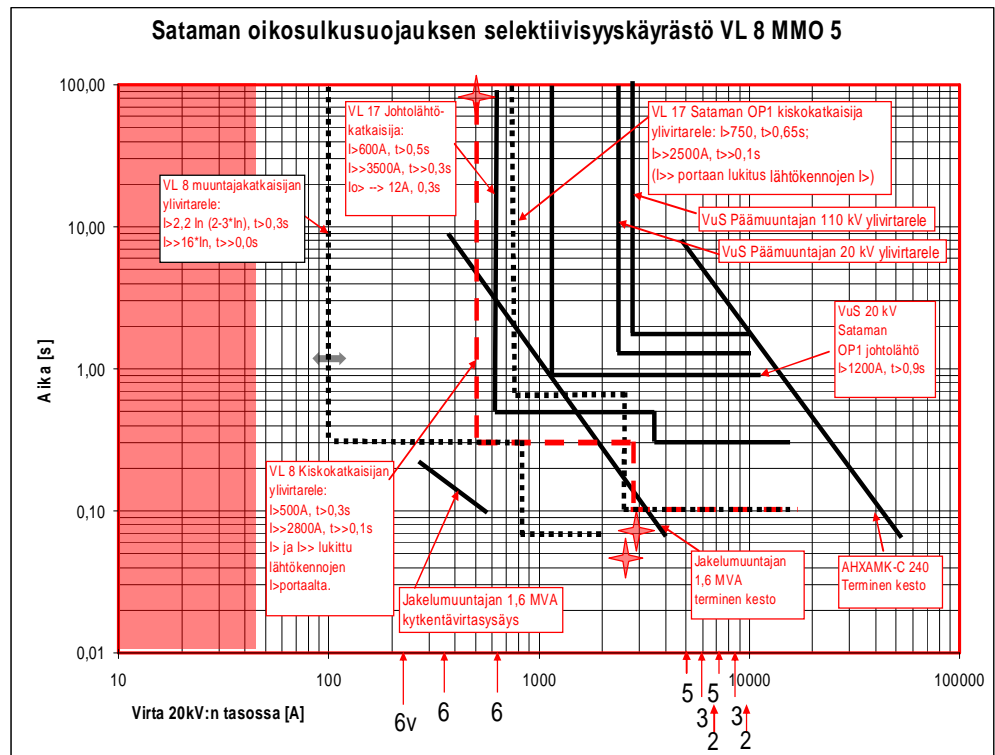
- taustaverkon oikosulkuteho 400 MVA
- laskentajännite 20 kV
- IEC-60909 jännitekerroin c 1,0
- johtimen lämpötila oikosulussa 160 °C
- kaapelin johtimen resistanssi $R_{j,\theta_{max}} = (1 + 0,004 / ^\circ\text{C}(\theta_{max} - 20^\circ\text{C}))R_{j,20^\circ\text{C}}$
- käämikytkin keskiasennossa.

Laskennan perusteella saatiin Sataman ostopisteisiin oletetulla peruskäyttötilanteella (liite 4) seuraavat minimi- ja maksimioikosulkuvirrat.

Taulukko 7. Peruskäyttötilanteen mukaiset pienimmät I_{k2} ja suurimmat I_{k3} oikosulkuvirrat

	Vikapaikka	Vikavirta (kA)		Redusoitu 20 kV vikavirta (kA)	
		I_{kmin}	I_{kmax}	I_{kmin}	I_{kmax}
1	VuS, 110 kV kisko	1,69	40	9,3	220
2	VuS, 20 kV kisko	6,6	9,43	6,6	9,43
3	VL17 OP1, 20kV kisko	6,18	8,74	6,18	8,74
4	VL18, 20kV kisko	5,83	8,26	5,83	8,26
5	VL 8, 20 kV kisko	5,04	7,2	5,04	7,2
6	VL 8, 400 V kisko	32,8 (1~)	34,5	0,38 (1~)	0,69

Poikkeuskäyttötilanteessa, jossa ostopistettä 1 syötetään vain yhdellä kaapelilla ja jonka lisäksi kaapeliyhteys väliltä VL17 ja VL 9 on vioittunut, saatiin pisimmällä sijaitsevan muuntamon VL 9 oikosulkuvirroiksi $I_{k3max} = 6,16$ kA ja $I_{k2min} = 4,24$ kA.



Kuva 19. Esimerkki Sataman oikosulkusuojauksen selektiivisyydestä

Kuvaan 19 on merkitty liitteestä 4 ilmenevät verkon eri paikoissa lasketut minimi- ja maksimivikavirrat, sekä pienjännitepuolen pienin vikavirta (6v), joka on I_{k2min} kerrottuna valokaariresistanssilla kuvaavalla kertoimella 0,6. Kuvassa tähdellä merkityt portaat ovat lukittavia.

Oikosulkuvirrat putoavat pituuden funktiona ostopisteistä sataman verkkoon mentäessä riippuen sataman verkon topologiasta ja kytkentätilanteesta. Satamassa kaapelipituudet ovat varsin lyhyitä, joten voitaneen todeta, että oikosulkuvirtojen suuruuksien ollessa laskentatulosten luokkaa ei aikaselektiivisen oikosulkusuojauksen kannalta aiheudu ongelmia.

5.5.3 X-power-verkostolaskentaohjelma

Vertailevat oikosulkuvirrat sataman ostopisteisiin laskettiin Tekla Oy:n X-power verkostolaskentaohjelmalla laskentajännitteellä 21 kV ja laskentalämpötiloilla $T_{lk3max} = 20 \text{ °C}$ ja $T_{lk2min} = 40 \text{ °C}$. Laskelmat suoritettiin Vuosaaren sähköaseman 20 kV:n kojeistoista molempiin sataman liittymäpisteisiin ensisijaisesti peruskytkentätilanteessa.

Lisäksi suoritettiin poikkeuskytkentälaskennat ostopisteeseen 1 yhdellä kaapelilla tapahtuvan syötön tapauksessa ja ostopisteeseen 2 vaihtoehtoista reittiä tapahtuvan syötön tapauksessa (liite 3).

Laskennat suoritettiin todennäköisimmälle liittymäkaapelityypille AHXAMK-W 3 * 240+70 Cu seuraavilla laskentaparametreilla:

- vaihejohtimen resistanssi 20 °C:ssa 0,14 (Ω /km)
- vaihejohtimen reaktanssi 0,116 (Ω /km)
- maasuskeptanssi 94 (μ S/km/vaihe)
- käyttösuskeptanssi 94 (μ S/km/vaihe)
- suurin sallittu kuormitusvirta 325 (A)
- sallittu 1s oikosulkuvirta 20 (kA)
- jäähtymisaikavakio 90 (min).

Ostopisteen 1 oikosulkuvirroiksi peruskytkennällä eli kahdella AHXAMK-W 3 * 240+70 Cu-kaapelilla (pituus 1 685 m) saatiin:

- 3-v-oikosulkuvirta $I_{k3max} 7,779 \angle -83,99^\circ$ (kA)
- 2-v-oikosulkuvirta $I_{k2min} 7,424 \angle -83,62^\circ$ (kA).

Ostopisteen 1 oikosulkuvirroiksi poikkeuskytkennällä eli yhdellä AHXAMK-W 3 * 240+70 Cu-kaapelilla saatiin:

- 3-v-oikosulkuvirta $I_{k3max} 7,268 \angle -80,31^\circ$ (kA)
- 2-v-oikosulkuvirta $I_{k2min} 6,910 \angle -79,66^\circ$ (kA).

Ostopisteen 2 (pohjoisportti) oikosulkuvirroiksi peruskytkennällä (pituus 1 625 m) saatiin:

- 3-v-oikosulkuvirta $I_{k3max} 7,314 \angle -80,52^\circ$ (kA)
- 2-v-oikosulkuvirta $I_{k2min} 6,954 \angle -79,91^\circ$ (kA).

Ostopisteen 2 (pohjoisportti) oikosulkuvirroiksi vaihtoehtoisella syöttöreitillä (pituus 2 285 m) saatiin:

- 3-v-oikosulkuvirta $I_{k3max} 6,927 \angle -77,96^\circ$ (kA)
- 2-v-oikosulkuvirta $I_{k2min} 6,577 \angle -77,14^\circ$ (kA).

Virtojen kulmista havaitaan R/X-suhteiden suuruudet, jotka jäävät välille 0,11 - 0,23. Taulukoista esim. ABB TTT saadaan karkeasti vastaavat sysäysker-
toimet K (1,7 - 1,5). Kaavan 10 avulla laskettiin suurin ostopisteissä esiintyvä
sysäysaikokuvavirta i_{pmax} .

Suurimmat dynaamiset voimat 20 kV:n verkossa aiheutuvat ostopiste 1:ssä
peruskyskyntä tilanteessa eli tuplasyötöllä $i_{pmax} = 18,75$ kA.

5.5.4 Oikosulkusuojauksen toteutus

Selektiivinen oikosulkusuojaus toteutetaan virta- ja aikaporrastamalla, jonka
pääperiaatteet selviävät liitteistä 4 ja 5 sekä kuvasta 19. Lisäksi käytetään
lukitussuojauksia kojeistojen lähtökatkaisijoiden ja kiskokatkaisijoiden välillä,
jonka avulla nopeutetaan suojauksen toimintaa.

Työssä esitetyt porrastajat tarkoittavat suojauksen kokonaistoiminta-aikoja,
jotka sisältävät:

- asetteluviiveajat
- releajat
- katkaisijan toiminta-ajat.

Tästä johtuen releitä aseteltaessa huomioidaan asetteluviiveaikojen sisälty-
minen kokonaisaikaan ja asetellaan esim. muuntajakennon $I >$ portaassa: $0,3$
 $s - 0,05 s = 0,295 s$.

Muuntamoiden pääkatkaisijoilla, jotka toimivat muuntamoiden kiskosuojina ja
joiden $I >>$ portaan $t >>$ viive saa lukituksensa lähtökentöjen $I >$ portaasta,
asetellaan $0,1 s$ sen vuoksi, että lukituksen antavan portaan havahtumisaika
ei ylitä asetteluaikaa. Toisin sanoen lukituksen antava porras ehtii lukita lu-
kittavan portaan kiskoston ulkopuolella tapahtuvissa vioissa.

20 kV:n kiskosuojaus

Kiskostojen oikosulkujen varalta varaudutaan myös valokaarisuojalaittein,
jotka ovat erittäin nopeita suojalaitteita (toiminta-ajat n. 2 - 7 ms). Valokaa-
risuojalaite saa toisen indikaation virran muutosnopeudesta eli derivaatasta,
ja toisen valosta.

Muuntamoiden VL16 ja VL17 kiskostojen vioissa toimivat pääkatkaisijoiden I>> portaat 0,1 s viiveillä valokaarisuojauksen kanssa. Pääkatkaisijoiden I>> portaiden toiminta lukitaan jos joidenkin lähtöjen releiden I> portaat havahtuvat (liitteet 4 ja 5).

Suojaus toimii selektiivisesti mahdollisissa poikkeustilanteissa, joissa jokin keskijännitekaapeli sataman verkossa on viallinen, mutta ei siinä epätodennäköisessä poikkeustilanteessa, jossa toisen ostopisteen muuntamo saa syöttönsä toisen ostopisteen kautta.

Muuntajasuojaus

Muuntajalähdöissä ostopisteiden muuntamoilla I>> porras suojaa muuntajaa yläjännitepuolen vioissa ja I> porras alajännitepuolen vioissa toimien samalla myös varasuojana 400 V:n katkaisijasuojaukselle.

Muuntajalähdöissä I> portaan asetteluiksi voidaan valita esim. $2,2 \cdot$ muuntajan nimellisvirta, jota voidaan tarvittaessa nostaa $n \cdot 3 \cdot I_n$, jos selektiivisyys alajännitepuolen suojien kanssa sitä vaatii.

Sataman muilla alamuuntamoilla aikaselektiivisyyttä ei saada aikaan lähtöjen ja pääkatkaisijoiden välille, joten alamuuntamoissa lähtöjen I> portaan havahtuminen lukitsee pääkatkaisijan I> ja I>> portaat.

Oikosulkuvirrat ja suojaus pienjänniteverkossa

Sataman pienjännitekojeistoissa esiintyvät suurimmat oikosulkuvirrat laskettiin samalla Excel-sovelluksella ostopisteessä 1 olevan muuntamo VL 17 muuntajan toisionavoissa tapahtuvassa symmetrisessä kolmivaiheoikosulussa. Tulokseksi saatiin $I_{k3 \max pj} = 35,1$ kA, josta karkeasti dynaamiseksi maksimioikosulkuvirraksi saadaan $I_{dyn \max pj} = 2,5 \cdot I_{k3 \max pj} = 87,75$ kA.

Muuntajien rinnankäyttö

Normaalikäytössä pienjännitepääkeskusosien (liitteessä 3 ja 4 CE61 ja CE62 muuntamalla VL17) välinen katkaisija on auki. Jos muuntajien rinnankäyttötilanteeseen joudutaan syystä tai toisesta oikosulkuvirrat kasvavat karkeasti seuraavan tarkastelun mukaisesti:

$$S_{kQ \max(VL17)} \approx 300 \text{ MVA}$$

$$S_{T(CT61 \text{ ja } CT62)} = \frac{S_n}{Z_k} = \frac{1,6 \text{ MVA}}{0,06} = 26,7 \text{ MVA}$$

$$S_{kVL17(CT61 \text{ rinnan } CT62)} = \frac{300 \times 53,7}{300 + 53,4} = 45,3 \text{ MVA}$$

$$I''_{kVL17(CT61 \text{ rinnan } CT62)} = \frac{1,1 \times 45,3 \text{ MVA}}{\sqrt{3} \times 400 \text{ V}} = 71,9 \text{ kA}$$

Tuloksista havaitaan oikosulkuvirtojen kasvavan liian suuriksi muuntajien rinnankäyttöön.

Syötön automaattinen poiskytkentä

Syötön automaattisen poiskytkennän kannalta esiintyvät pienimmät mahdolliset yksivaiheisen oikosulkuvirran arvot laskettiin IEC-60909 mukaisesti.

Tarkastelu suoritettiin muuntamalla VL2, jossa on pienimmät muuntajat (1 MVA) ja 20 kV:n kytkentätilanteen ollessa sellainen että kaapeli väliltä VL16 ja VL2 on viallinen. Esimerkkikohteeksi valittiin sellainen syöttölähtö, jonka kuormitustiedot ovat tarkentuneet. Tarkasteltava kohde ilmenee liitteestä 4.

Muuntamon VL2 muuntaja CB81 syöttää perävaunujen parkkialuetta ns. semireefer-kuormaa (200 kW, arvioitu $\cos\phi = 0,85$) kahdella 4 * 185 AXMK-tyyppisellä alumiinikaapelilla, kaapeleiden pituuden ollessa noin 150 m. Oikosukusuojaus toteutetaan 250 A gG-typin sulakkeilla ja ylikuormitus-suojaus kuorman päässä olevilla gG 200 A sulakkeilla.

Laskennan lähtökohtana oli X-powerilla saatu minimoikosulkuvirta-arvo ostopisteessä 2 (VL16), josta saatiin taustaverkon impedanssi lisäämällä siihen poikkeuskytkentätilanteen tuoma lisäimpedanssi 0,95 km AHXAMK-W 240 mm².

Syöttöverkon impedanssi

$$Z_Q = \left(\frac{cU_{nQ}}{\sqrt{3}I_{kQ(OP2)}} + Z_{kj90^\circ(0,95km)} \right) \times \frac{1}{t_r^2}$$

$$Z_Q = \left(\frac{1,0 \times 20kV}{\sqrt{3} \cdot 6,927 \angle -77,96^\circ kA} + 0,95km(0,16 + j0,11) \frac{\Omega}{km} \right) \times \left(\frac{0,41kV}{20kV} \right)^2$$

$$\underline{Z}_Q = (0,210 + j0,729)m\Omega$$

Jakelumuntajan myötä- ja nollaimpedanssit

$$Z_T = \frac{u_{kr}}{100\%} \times \frac{U_{rT}^2}{S_r} = \frac{4,8\%}{100\%} \times \frac{(410V)^2}{1000kVA} = 8,069m\Omega$$

$$R_T = \frac{P_{krT}}{3I_{rT}^2} = \frac{P_{krT} \times U_{rT}^2}{S_{rT}^2} = \frac{10,5kW \times (410V)^2}{(1000kVA)^2} = 1,765m\Omega$$

$$u_{kr} = \frac{P_{krT}}{S_{rT}} \times 100\% = 1,05\% ; \quad u_{Xr} = \sqrt{u_{kr}^2 - u_{Rr}^2} = 4,684\%$$

$$X_T = \sqrt{Z_T^2 - R_T^2} = 7,874m\Omega$$

$$\underline{Z}_T = (1,765 + j7,874)m\Omega$$

$$K_T = 0,95 \frac{c_{max}}{1 + 0,6x_T} = \frac{1,05}{1 + 0,6 \times 0,04684} = 1,021$$

$$\underline{Z}_{TK} = \underline{Z}_T K_T = (1,803 + j8,042)m\Omega$$

$$Z_{(0)TK} = 1,2 \times \underline{Z}_T K_T = (2,164 + j9,650)m\Omega$$

Kaapeleiden myötä- ja nolaimpedanssit

$$\underline{Z}_{L(80^\circ)} = 0,5 \cdot (0,207 + j0,080) \frac{\Omega}{km} \times 0,15 km = (15,53 + j6) m\Omega$$

Kaapelin nolaimpedanssin kertoimet on saatu IEC60909-4-standardista ja paluuvirran on ajateltu palaavan sekä PEN-johdinta että maata pitkin takaisin.

$$R_{(0)L} = 3 \times R_L; X_{(0)L} = 4,46 \times X_L$$

$$Z_{(0)L} = (46,58 + j26,76) m\Omega$$

Pienimmät vikavirrat

$$I_{k3}'' = \frac{cU_n}{\sqrt{3} \times Z_k} = \frac{0,95 \times 400V}{\sqrt{3} \times 22,31 m\Omega} = 9,83 kA$$

Kun huomioidaan valokaariresistanssi kertoimella 0,6 saadaan $I_{k3} = 5,9$ kA.

$$I_{k1}'' = \frac{\sqrt{3}cU_n}{|2\underline{Z}_{(1)} + \underline{Z}_{(0)}|} = \frac{\sqrt{3} \times 0,95 \times 400V}{|2 \times 22,31 + 56,15| m\Omega} = 6,53 kA$$

Kun huomioidaan valokaariresistanssi kertoimella 0,6 saadaan $I_{k1} = 3,9$ kA.

Automaattisen poiskytkennän vaatimat pienimmät oikosulkuvirrat taulukoista esim. D1 (rakennusten sähköasennukset) ovat 250 A gG-sulakkeilla 5 s poiskytkentäajalla 1 650 A, joten voidaan todeta että, oikosulkuvirrat riittävät myös pienjänniteverkon suojaukseen esimerkkipaikassa hyvin.

Jännitteenalenema

Jännitteen alenemaksi esimerkkitapauksessa saatiin:

$$\Delta U = I \times l \times \sqrt{3} \times (r \cos \varphi \pm x \sin \varphi) [V] \quad \Delta u = \frac{\Delta U}{U_n} \times 100 \%$$

$$\Delta u = 2,4\%$$

Laskettiin em. esimerkkitapauksessa maksimaalinen syöttöpituus samoilla suojalaitteilla huomioiden valokaariresistanssi kertoimella 0,6.

$$I_{k1\min(gG250)}'' = \frac{\sqrt{3} \times c \times U_n}{0,6 \left[2 \left(0,5 \underline{Z}_L \frac{\Omega}{km} \times Xkm + \underline{Z}_{TK} + \underline{Z}_Q \right) + \left(0,5 \underline{Z}_{(0)L} \frac{\Omega}{km} \times Xkm + \underline{Z}_{(0)TK} \right) \right]}$$

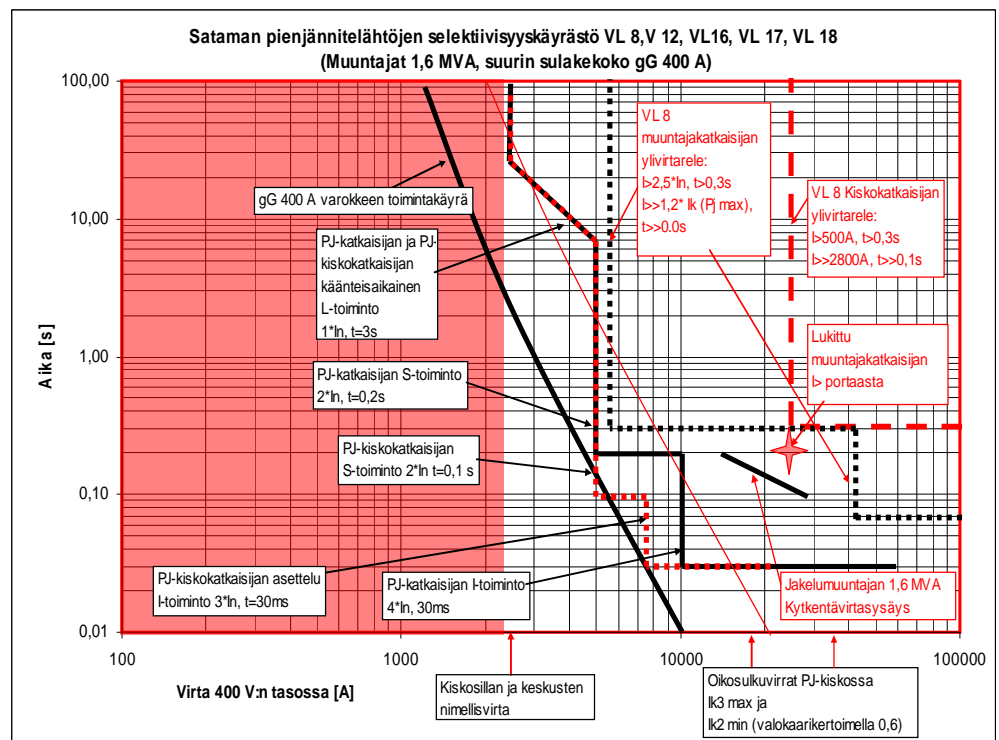
$$X = 0,41 km$$

ja jännitteenalenemaksi saatiin 6,6 %.

Laskelmista voidaan päätellä, että vaikka pienjännitetehtojen siirtoetäisyydet muodostuvat paikoitellen suhteellisen pitkiksi, ei suojausmielessä niistä pitäisi aiheutua ongelmia.

Esimerkki pienjännitesuojauksen selektiivisyydestä

Kuvasta 20 ilmenee pienjännitekeskusten pääkatkaisijoiden suojauksen selektiivisyys 400 A gG sulakkeen kanssa. Suojauksen tarkemmasta asettelusta tekee hankalan se, että katkaisijan suojausalueen käänteisaikaisen suojaikäyrän kulmakertoa ei voida muuttaa PR121-tyypissä.



Kuva 20. Esimerkki pienjännitesuojauksen selektiivisyydestä

Kuvassa 20 punaisella piirretty viiva kuvaa 630 A gG sulakkeen toimintakäyrää, jonka tullessa kyseeseen voi selektiivisyydestä muuntajasuojan kanssa tulla ongelmia. Muuntajalähdön I_p porrasta tulisi nostaa n. $3,5 \cdot I_{n(\text{muuntaja})}$ selektiivisyys käyrästöjen leikkaavuuden eliminoimiseksi.

5.6 Maasulkusuojaus

Vuosaaren sähköasemalta lähtevien keskijännitejohtojen yhteispituus on noin 100 km. Lähtevät syötöt ovat kaikki maakaapelilähtöjä ja lähes yksinomaan AHXAMK-W 240 mm²-tyyppisiä kaapeleita, joiden kehittämän kapasitiivisen maasulkuvirran summa on karkeasti noin 20 - 30 kertaa sataman syöttämä maasulkuvirta.

Tämä tarkoittaa sitä että satamassa olevat maasulkureleet tulevat saamaan aina vian sattuessa tarpeeksi suuren virran, ja suojaus on näin ollen helppo järjestää.

5.6.1 Maasulkulaskennan lähtökohdat

Maasulkutarkastelun lähtökohdista olivat tulosteet Vuosaaren sähköaseman releasetteluista ja maasulkujen suojausalueista. Tulosteet olivat lokakuulta 2006, joten niistä puuttuivat Vuosaaren satamakeskukseen ja meriportin yritysalueen keskijännitekaapeliyhteydet, ja siten myös niiden maasulkuvirrat.

5.6.2 Maasulkuvirrat

Lokakuun tilanteessa Vuosaaren sähköaseman keskijännitekaapeleiden maakapasitanssit kehittävät maasulkuvirtaa suorassa maasulussa maksimissaan 313,8 A. Vikaresistanssin ollessa 500 Ω ne kehittävät 24,2 A.

Satamakeskuksen kaikkien nyt suunnitteilla olevien liittyjien käyttöönoton jälkeen sekä meriportin yritysalueen valmistuttua Vuosaaren sähköasemalta lähtevien keskijännitekaapeleiden kokonaispituus kasvaa noin 15 km. joka lisää noin 50 A kokonismaasulkuvirtaa.

Sataman taustaverkon syöttämä maasulkuvirta tulee olemaan normaalikäyttötilanteessa noin puolet taustaverkon kokonismaasulkuvirrasta (noin $360 \text{ A} / 2 = 180 \text{ A}$), sillä sähköasemaa käytetään pääsääntöisesti kahdella päämuuntajalla.

Sataman verkko

Sataman 20 kV:n verkko kehittää kapasitiivista maasulkuvirtaa peruskäytön tilanteessa karkeasti arvioituna:

- VL17 ostopiste 1:ssä n.13 - 17 A nosturikaapeleista riippuen
- VL16 ostopiste 2:ssa n. 5 A.

Sataman verkossa tapahtuvissa maasuluissa normaalikäyttötilanteessa (kahden päämuuntajan tapauksessa), taustaverkko syöttää noin 180 A vikavirtaa satamaan päin.

Vikaresistanssin vaikutuksesta vikavirta pienenee, ja esim. vikaresistanssin ollessa 500Ω maasulkuvirta on noin 24 A. Kaavasta 19 laskemalla, $1\ 000 \Omega$ vikaresistanssilla maasulkuvirraksi saadaan noin 12,1 A.

5.6.3 Maasulkujännitteet

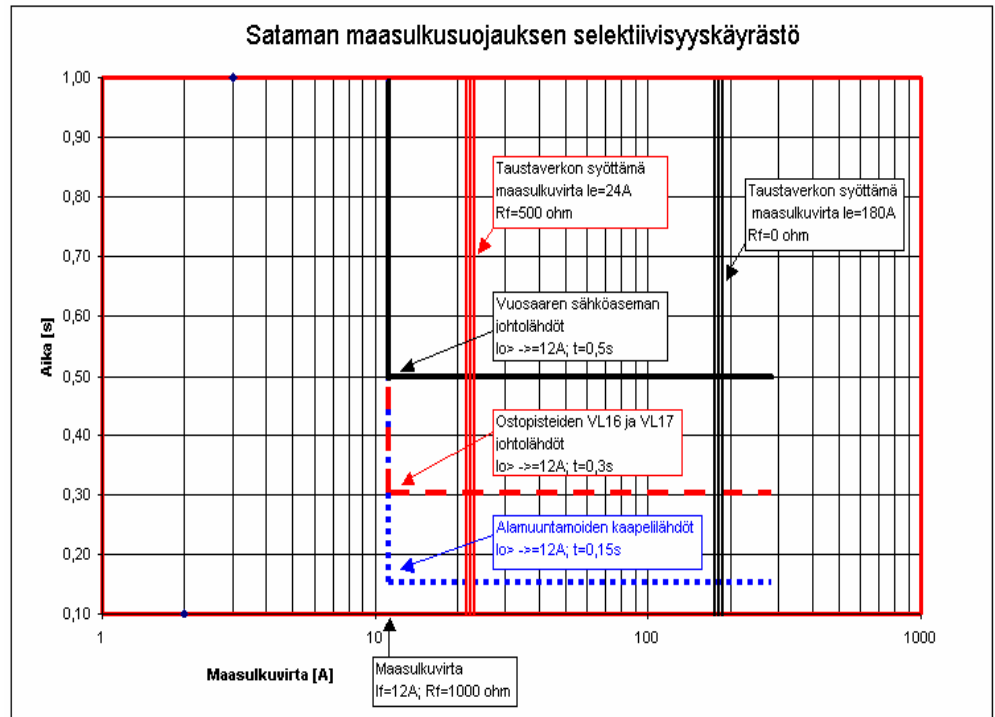
Maasulkujännitteelle toiminta-arvoksi asetellaan $U_0 = 5 \%$, joka on sama asettelu kuin Vuosaaren sähköasemalla. Kaavasta 20 laskemalla sataman verkossa esiintyvät nollajännitteet 500Ω vikaresistanssilla ovat luokkaa 13 %. Nollajännitteen 5 % asetteluraja vastaa noin $1\ 345 \Omega$ vikaresistanssia.

5.6.4 Maasulkusuojauksen toteutus

Koska Vuosaaren satamakeskuksen alueella esiintyvät maasulkuvirratt ovat lähes täysin riippuvaisia Helen Sähköverkko Oy:n Vuosaaren sähköasemalla yhteen kytketyn kaapeliverkon (taustaverkko) syöttämistä maasulkuvirroista, on sataman verkkoon helppo saada toteutettua varmatoiminen ja aikaporrastamalla selektiivinen maasulkusuojaus (liitteet 4 ja 5).

Maasulkusuojauksen toiminta-arvot ovat Vuosaaren sähköasemalla $I_0 = 12 \text{ A}$ ja $U_0 = 5 \%$. Maasulkusuojauksen toimintaviiveenä on 0,5 s.

Sataman verkossa on suunnatut maasulkureleet VL16 ja VL17 lähtevillä johdotölhdöillä, mutta ei pääkatkaisijalla. Toiminta-arvoina voidaan käyttää samoja arvoja kuin Vuosaaren sähköasemalla. Aikaviiveeksi asetellaan 0,3 s. Alamuuntamoilla kaapelilähtökennojen suunnattujen maasulkureleiden aikaviiveeksi asetellaan 0,15 s (kuva 21).



Kuva 21. Maasulkusuojausajan aikaporrastuksen periaate

6 YHTEENVETO

Työn tavoitteena oli selvittää Vuosaaren sataman sähköverkon suojauskoordinaatiota, topologiaa, ja myös tehonjakoa. Työtä tehdessä sataman maanrakennusurakat olivat vielä kesken, joten monen sähköteknisen asian osalta eksaktin tiedon saaminen oli mahdotonta, ja näin ollen moni asia tulee tarkentumaan projektin edetessä.

6.1 Topologiatarkastelu

Topologiatarkastelussa kahden itsenäisen 20 kV:n syöttörengaan vaihtoehto vaikuttaa hyvältä ratkaisulta erityisesti siksi, että näin saadaan taattua kaikille sataman operaattoreille sama sähkönsyöttövarmuus, eikä näin ollen vakavistakaan vikatilanteista aiheudu juridisia epäselvyyksiä. Lisäksi 20 kV:n renkaiden yhteen liittämisen mahdollisuus VL9:llä lisää verkon käyttömahdollisuuksia poikkeustilanteissa.

Sellaisten poikkeustilanteiden varalle, joissa syöttörengaat jouduttaisiin yhdistämään, olisi hyvä luoda erilaisia toimintamalleja sataman käytönjohdon kanssa. Malleja varten tarvittaisiin tarkempia arvioita sataman kuormitustiedoista, sekä tietoja sataman käytönvalvonta- ja ohjausjärjestelmästä.

Lisäksi Helen Sähköverkko Oy:ltä tarvittaisiin tarkat tiedot ostopisteiden maksimaalisista tehonsyöttökyvyistä.

Laivojen maistasyöttöjen mahdollisesti joskus toteutuessa, on kahden renkaan topologia edelleen toimiva ratkaisu. Satama-alueelle sijoitetaan 110/20 kV:n pienoissähköasema, josta kaapeloidaan samoille syöttöasteille 1 ja 2 sekä lisäksi muuntamolle V12 ostopisteeseen 3.

6.2 Tehonjakotarkastelu

Suoritettu tehonjakotarkastelu perustui oletettuihin käyttö- ja kuormituskerroksiin sekä työn tekohetkellä saatavilla käytettävissä oleviin kuormitustietoihin.

Pienjännitekuormien osalta käytettiin kautta linjan kerrointa 0,6. Suurjännitteellä syötettävien nostureiden kertoimet perustuivat Finnsteveltä saatuihin tietoihin satamassa tapahtuvan lastinkäsittelyn perusnostomassojen suhteesta nostureiden maksiminostokykyyn. Tarkastelun tulokset ilmenevät liitteestä 3.

6.3 Suojauskoordinaatio

Suojauskoordinaatio peruskäyttötilanteessa oikosulkujen ja maasulkujen osalta toteutuu liitteistä 4 ja 5 ilmenevin ehdoin hyvin. Lähtötietojen vajavuudesta johtuen osa virtamuuntajien muuntosuhteista on oletettua tietoa. Kuvassa 19 on esitetty esimerkki oikosulkusuojauksen selektiivisyydestä.

Suunnattu maasulkusuojaus on perusteltua ostopisteiden johtolähtökatkaisijoilla, sillä renkaiden ollessa yhteen kytkettyinä, saattaa maasulkuvirta satamassa kasvaa asetteluja suuremmaksi, ja näin ollen saattaisi suuntaamaton maasulkusuojaus reagoida sataman ulkopuolisiin vikoihin.

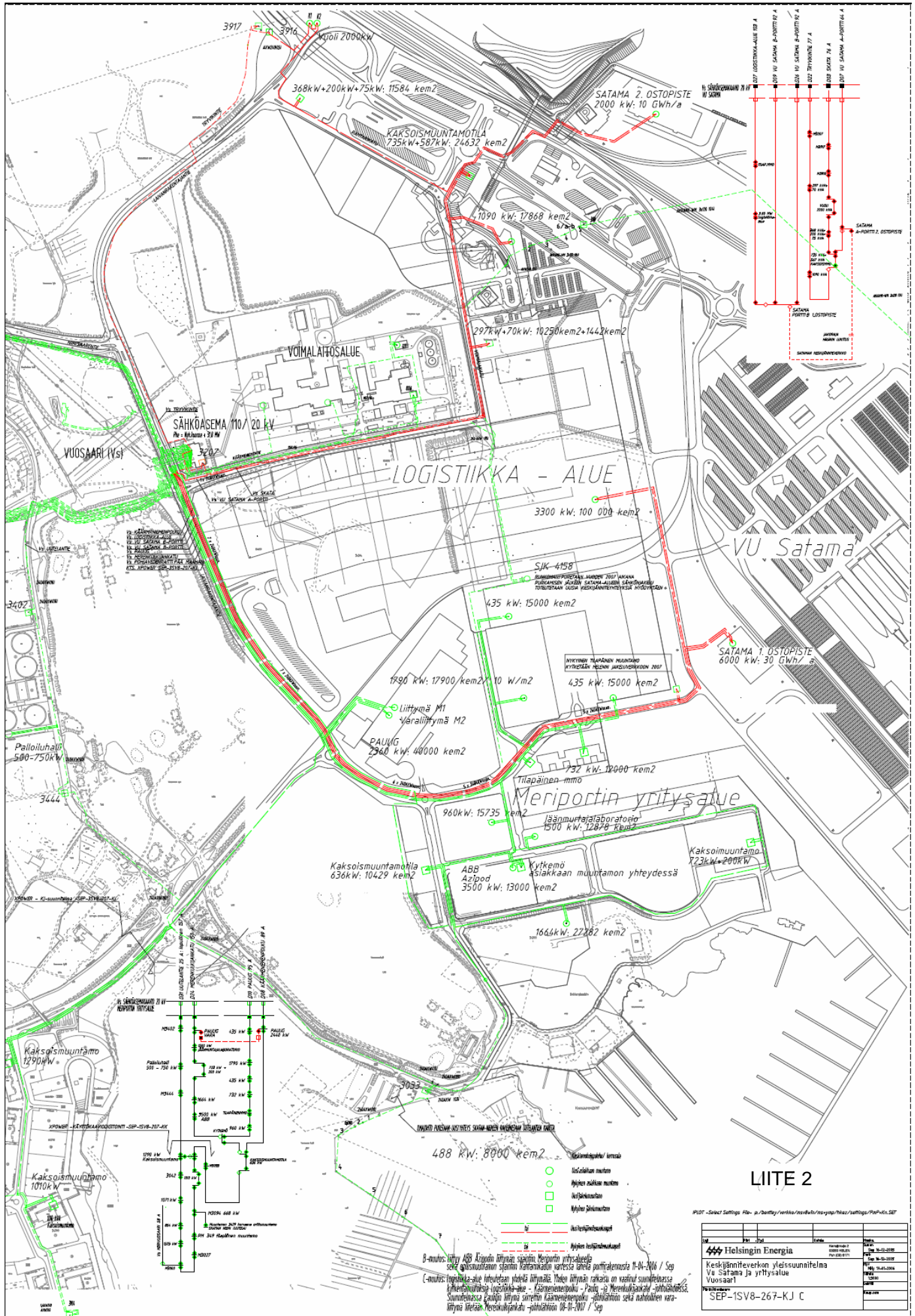
Alamuuntamoiden lähtökennoissa (esim. nosturit) suunnatulla maasulkusuojalla saavutettu hyöty on näennäinen.

Toimiva 400 V:n suojauskoordinaatio saavutetaan porrastamalla gG-tyyppin sulakkeet sopivasti. Kuvassa 20 on esitetty 400 V:n suojauskoordinaatio, josta ilmenee pien- ja suurjännitekatkaisijan, sekä mahdollisesti käyttöön tulevien 630 A gG-sulakkeiden selektiivisyysongelma.

LÄHTEET

- [1] Helsingin Energia, [verkkodokumentti]. [viitattu 19.2.2007]. Luettavissa: <http://www.helsinginenergia.fi/yritys/lyhyesti.html>
- [2] Helsingin satama, [verkkodokumentti]. [viitattu 19.2.2007]. Luettavissa: <http://www.vuosaarensatama.fi/kysytya/index.html>
- [3] Helsingin satama, [verkkodokumentti]. [viitattu 19.2.2007]. Luettavissa: <http://www.vuosaarensatama.fi/fi/kustannukset.html>
- [4] Helsingin satama, [verkkodokumentti]. [viitattu 19.2.2007]. Luettavissa:
<http://www.vuosaarensatama.fi/logistiikkaalue/index.html>
- [5] Helsingin satama, [verkkodokumentti]. [viitattu 19.2.2007]. Luettavissa: <http://www.vuosaarensatama.fi/yritysalue/index.html>
- [6] Helsingin satama, [verkkodokumentti]. [viitattu 19.2.2007]. Luettavissa: <http://www.vuosaarensatama.fi/merivayla/index.html>
- [7] Helsingin satama, [verkkodokumentti]. [viitattu 19.2.2007]. Luettavissa: <http://www.vuosaarensatama.fi/satamarata/index.html>
- [8] Mörsky, Jorma, *Relesuojaustekniikka*. 1. painos. Hämeenlinna: Otatieto Oy 1992. ISBN 951-672-143-5.
- [9] Suomalaiset ABB yhtiöt, *Teknisiä tietoja ja taulukoita*. 9. painos. Vaasa: Ykkös-Offset Oy 2000. ISBN 951-99366-0-2.
- [10] Vedenjuoksu Timo, Hyvärinen – Markku, *Relesuojaukset keskijänniteverkossa, kurssimateriaali*. 6.10.2005 Tampere. järjestäjä inspecta koulutus.
- [11] Ahola, Reetta, *20kV:n jännite- ja virtasensorit*. seminaarityö 10.4.2001. [verkkodokumentti]. [viitattu 19.2.2007]. Luettavissa: http://www.ee.lut.fi/stats/estat_logger.php?ID=68

- [12] Suomen standardisoimisliitto, *SFS 6001 Suurjännitesähköasennukset*. Helsinki: Suomen sähköteknillinen standardisoimisyhdistys SESKO 2001.
- [13] Elovaara, Jarmo & Laiho, Yrjö, *Sähkölaitostekniikan perusteet*. 1. painos. Hämeenlinna: Otatieto Oy 1988. 487 s. ISBN 951-627-033-1
- [14] ABB, *REX-521 tekninen ohje*. [verkkodokumentti]. [viitattu 19.2.2007]. Luettavissa: [http://library.abb.com/GLOBAL/SCOT/scot229.NSF/VerityDisplay/1ACE541C82C08B3FC2256F250037FFF5/\\$File/rex521techfid.pdf](http://library.abb.com/GLOBAL/SCOT/scot229.NSF/VerityDisplay/1ACE541C82C08B3FC2256F250037FFF5/$File/rex521techfid.pdf)
- [15] ABB, *REA 101 asennus ja käyttöohje*. [verkkodokumentti]. [viitattu 19.2.2007]. Luettavissa: [http://library.abb.com/GLOBAL/SCOT/scot229.NSF/VerityDisplay/09F6A55963022C00C2256EF20033DFF7/\\$File/REA101Fid.pdf](http://library.abb.com/GLOBAL/SCOT/scot229.NSF/VerityDisplay/09F6A55963022C00C2256EF20033DFF7/$File/REA101Fid.pdf)



LIITE 2

PI07 - Select Settings R0 - p:/bentley/verko/rs/06/06/rs-ymp/ntas/saattaja/P04/K01/SEP

Id	Pää	Tila	Luokka
444	Helsingin Energia	06-01-01	06-01-01
Keskiäänneverkon yleissuunnitelma Vu Satama ja yritysalue Vuosaari			
Keskisuunnitelmasta: SEP-15V8-267-KJ C			
Keskisuunnitelmasta: SEP-15V8-267-KJ C			

B-muutos: liitetty ABB Arzipodin liittymä Meriportin yritysalueelle sekä yleissuunnitelman ajantasaistamiseksi kaivantojen ja kaapelien välillä 11-11-2016 / Sep
 C-muutos: logistiikka-alue toteutetaan yhdellä liittymällä. Tämän liittymän rakentaminen on vaativampi suunnittelussa ja toteutuksessa logistiikka-alue -kaivantojen ja kaapelien välillä. Suunnitelmasa päättyi liittymän sijoittamiseen kaivantojen ja kaapelien välillä Meriportin yritysalueelle 11-11-2017 / Sep

